

# E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación

## “Diseño de un prototipo de una máquina AFP o Automated Fiber Placement”



Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

Autor: Darío Xavier Conde Martínez

Tutor: José Sancho

Pamplona, 15 de Septiembre del 2017

## **RESUMEN**

### **“Diseño de un prototipo de una máquina AFP o Automated Fiber Placement”**

Los materiales compuestos de fibra de carbono en matriz polimérica, tienen actualmente un amplio campo de aplicaciones, sobre todo en la industria aeronáutica, pero cada vez más en la aeroespacial, del transporte y militar. Los procesos de fabricación automatizados de materiales compuestos se han abierto camino en estos sectores gracias a su elevada productividad y eficacia. Estos consisten principalmente en encintar de manera automática, sobre un molde, tiras o bandas de fibra pre-impregnada en resina en diferentes direcciones para obtener una pieza con las exigentes restricciones mecánicas que estos sectores necesitan. Este proyecto tiene como objetivo diseñar un prototipo de una máquina de encintado de fibra de carbono controlado por CNC; dicho controlador está basado en Arduino ya que es muy fácil de adquirir, mientras que el cabezal se fabricará en ABS en una impresora 3D cuyo diseño está basado en la obtención de una única pieza mediante este proceso, por último, se generará una aplicación para observar el resultado en la máquina.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Objetivo.....	6
1.2. Motivación.....	6
1.3. Alcance.....	8
2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Referencia Patentes Citadas.....	10
3. ANÁLISIS TEÓRICO.....	12
3.1. Materiales compuestos en Fabricación Aeronáutica.....	12
3.2. Introducción componentes Aeronáuticos.....	19
3.3. Procesos automáticos de fabricación materiales compuestos.....	25
3.4. Análisis de necesidades.....	28
3.5. Análisis de la solución.....	29
4. DESARROLLO DEL PROTOTIPO .....	30
4.1. Estructura.....	30
4.2. CNC y Accionamientos.....	32
4.3. Diseño del cabezal v1.0 .....	38
4.4. Diseño del cabezal v2.0 .....	41
4.5. Diseño de los rodillos de arrastre.....	43
4.6. Diseño del eje C.....	45
4.7. Montaje de la estructura.....	46
4.8. Sistema de corte de fibras.....	47
4.9. Sistema de compactación.....	48
4.10. Sistema calefactor de las cintas.....	49
4.11. Fabricación del Cabezal.....	50
5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.....	52
5.1. Descripción general del sistema.....	52
5.2. Interface Hombre-Máquina.....	53
5.3. Control ejes X, Y, Z.....	53
5.4. Firmware.....	55
5.5. Control servomotores.....	56
5.6. Control eje C.....	57

5.7. Control sistema calefactor.....	58
5.8. Post-procesado. ....	60
6. Bibliografía.....	61
I. ANEXO 1 .....	62

## ILUSTRACIONES

Figura 1: Modelo de aviones comerciales y porcentaje de fibra de carbono en el tiempo.....	6
Figura 2: Composición fuselaje Boeing 787 dreamliner.....	7
Figura 3: Boeing 787 dreamliner.....	7
Figura 4: TORRES LAYUP.....	9
Figura 5: Patente US 6.968.883 B2. Manuel Torres. ....	10
Figura 6: Rodillos de arrastre patente US 6.968.883 B2. Manuel Torres.....	10
Figura 7: Patente US 2007/0234907 A1. Manuel Torres. ....	11
Figura 8: Rodillos de arrastre y de corte. Patente US 2007/0234907 A1. Manuel Torres.....	11
Figura 9: Tipos de fibras Materiales compuestos. ....	13
Figura 10: Ejemplo laminado unidireccional.....	14
Figura 11: Ejemplo laminado 0/90 .....	14
Figura 12: Ejemplo laminado cuasi-isótropo.....	15
Figura 13: Proceso de pre-impregnado de fibras.....	16
Figura 14: Bobina de fibra de carbono pre-impregnada.....	16
Figura 15: Panel Sandwich tipo Honeycomb.....	17
Figura 16: Rigidez a flexión de un panel tipo honeycomb. ....	17
Figura 17: Ejemplo calculo factor de carga. ....	19
Figura 18: Maniobra típica de lanzamiento. ....	21
Figura 19: Distribución de presión en el ala. ....	21
Figura 20: Distribución de presión en el fuselaje.....	22
Figura 21: Partes de un avión comercial. ....	22
Figura 22: Paneles y ensamblaje de un fuselaje de aluminio.....	23
Figura 23: Panel y stringers en fibra de carbono para ensamblaje de fuselaje. ....	24
Figura 24: Diferencias laminado ATL y AFP. ....	25
Figura 25: Maquinaria ATL de MTORRES. ....	25
Figura 26: Maquinaria AFP de MTORRES.....	26
Figura 27: Descripción del proceso de aplicación de un AFP.....	29
Figura 28: Máquina de encintado automático tipo Gantry. MAG's Composite. ....	30
Figura 29: Material impresora 3D Prusa i3. ....	30
Figura 30: Montaje de la estructura de la impresora 3D .....	31
Figura 31: Ejemplo CNC Fanuc .....	32
Figura 32: Configuración de la placa controladora. ....	32
Figura 33: Arduino mega 250.....	33
Figura 34: Conectores que conforman la ramps 1.4.....	34
Figura 35: Drivers de potencia marca Pololu. ....	35
Figura 36: Representación esquemática de la conexión.....	35

Figura 37: Motor paso a paso nema 17. ....	36
Figura 38: Esquema motor paso a paso bipolar.....	36
Figura 39. Servomotor SG90. ....	37
Figura 40. Cabezal AFP o Automated Fiber Placement MTORRES.....	38
Figura 41: Boceto tren de arrastre V1.0.....	38
Figura 42. Soporte tren de arrastre.....	39
Figura 43. Tren de arrastre v1.0.....	39
Figura 44. Cabezal de aplicación v1.0 montado sobre la estructura.....	40
Figura 45: Rodillos de arrastre y de corte. Patente US 2007/0234907 A1. Manuel Torres. ....	41
Figura 46. Boceto cabezal v2.0.....	41
Figura 47. Diseño del soporte del cabezal v2.0.....	42
Figura 48: Rodillos de arrastre patente US 6.968.883 B2. Manuel Torres.....	43
Figura 49. Conjunto rodillo de arrastre. ....	44
Figura 50. Transmisión del sistema de arrastre. ....	44
Figura 51. Ejemplo transmisión por engranajes epicicloidal. ....	45
Figura 52. Sistema transmisión eje C. ....	45
Figura 53. Montaje estructura y cabezal v2.0.....	46
Figura 54. Ejemplos de aplicación de corte de cintas individuales. ....	47
Figura 55. Ejemplo sistema postprocesador para encintado discontinuo.....	47
Figura 56. Sistema de compactación.....	48
Figura 57. Rodillo de compactación. ....	48
Figura 58. Sistema calefactor por infrarrojos.....	49
Figura 59. Impresora 3D Ultimaker.....	50
Figura 60. Inserción de voladizos en la pieza.....	50
Figura 61. Cabezal v2.0 impreso en ABS. ....	51
Figura 62. Cabezal con soportes. ....	51
Figura 63. Definición de los ejes de la máquina.....	52
Figura 64. Control de corriente Pololu A4998.....	54
Figura 65. Interface programación Arduino.....	55
Figura 66. Configuración servomotor SG90.....	56
Figura 67. Señales de entrada del servomotor. ....	56
Figura 68. Sistema de transmisión eje C.....	57
Figura 69. configuración pasos por unidad de los ejes. ....	57
Figura 70. Sistema calefactor. ....	58
Figura 71. Termistor de 100K.....	58
Figura 72. PID control de temperatura firmware MARLIN.....	59

#### Abreviaturas.

TFM	Trabajo fin de máster
CNC	Computer numeric control
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
AFP	Automated fiber Placement
ATL	Automated Tape Laying

# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1. Objetivo.

El objetivo principal de este Trabajo fin de Máster es el de fabricar un prototipo de una máquina AFP (Automated Fiber Placement), gobernada por control numérico (CNC) para fabricar piezas en fibra de carbono mediante laminado dentro del sector aeronáutico.

## 1.2. Motivación.

Los materiales compuestos siempre han estado presentes en el sector aeronáutico desde 1960. Entre los más recientes avances, en la utilización de materiales compuestos, se encuentra la gran proeza del avión comercial Boeing 787 presentado en el año 2008 el cual tiene un 50% de su peso estructural fabricado en materiales compuestos, repartidos entre el fuselaje, los estabilizadores y las alas.

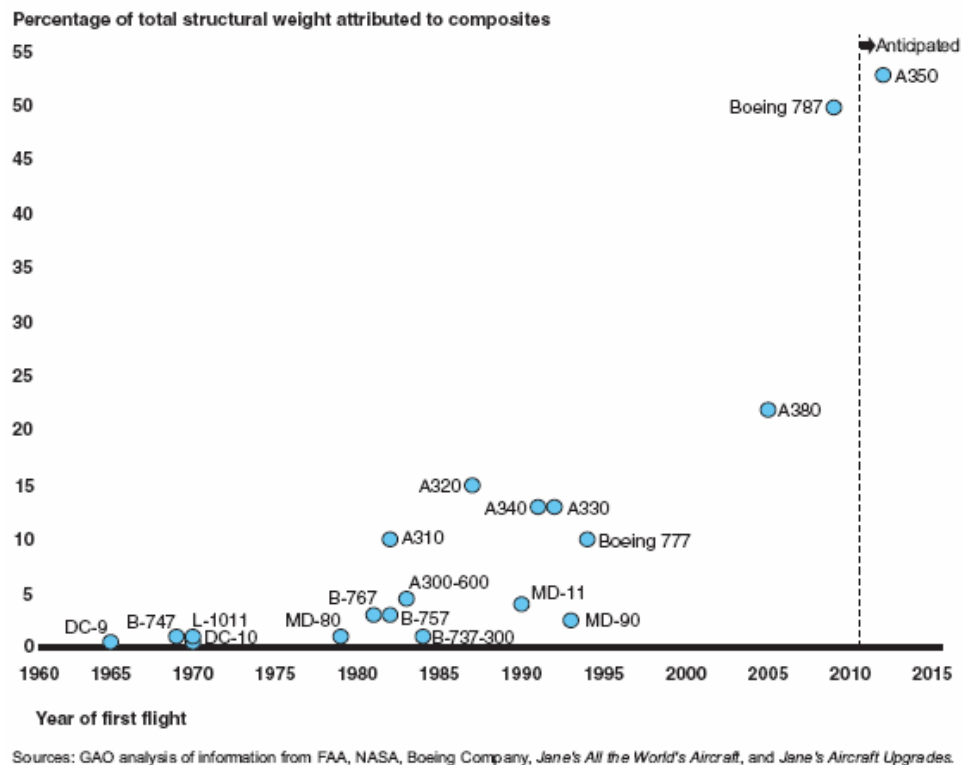


Figura 1: Modelo de aviones comerciales y porcentaje de fibra de carbono en el tiempo.

En este sector la tendencia para los últimos años es creciente, es por eso que los procesos de fabricación de materiales compuestos deberán aumentar su productividad diversificar las aplicaciones para la obtención de piezas en fibra de carbono. Estos procesos de fabricación tienen como reto la innovación y la disminución de costos para cumplir con las expectativas del mercado, mejores resina, mejores procesos y más productos deberían desarrollarse en los próximos años.

En el avión dreamliner 787 de Boeing, tanto el fuselaje y las estructuras de las alas son casi por completo un compuesto reforzado de fibra de carbono u otro material compuesto, como se puede observar en la siguiente imagen.

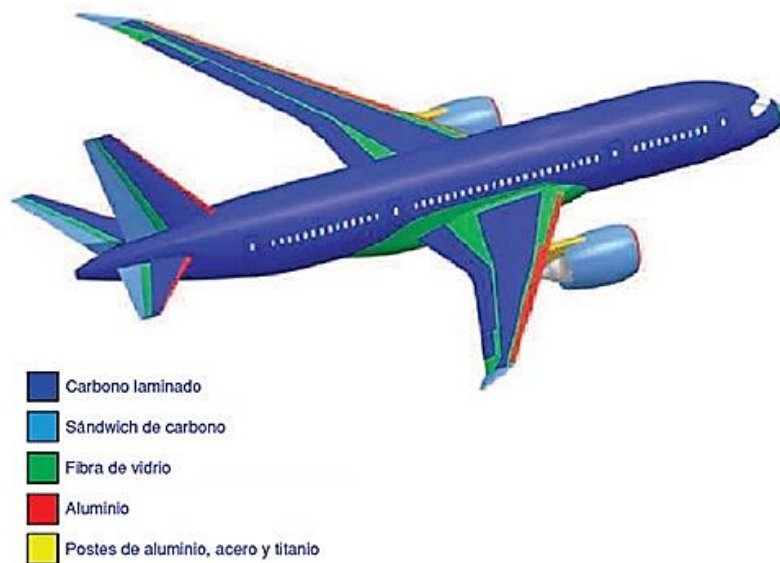


Figura 2: Composición fuselaje Boeing 787 dreamliner.

Lo más importante de la fibra de carbono es su fuerza, su ligereza y su resistencia a la corrosión, esas son las tres características claves para la fabricación de aviones. Es por eso que este avión pesa menos, 13600kg menos que un avión de aluminio similar que, si hubiese sido fabricado en metal, lo que aumenta la eficiencia energética y eso significa un billete más asequible aunque suba el precio del combustible.



Figura 3: Boeing 787 dreamliner.

En los años 70, Boeing, calculo que por cada kilo que se elimina del peso de un avión se podían ahorra hasta 100mil euros en combustible a lo largo de su vida útil. En aquella época el barril de petróleo costaba unos 15€ el barril, ahora el ahorra sería mucho mayor. El dreamliner es el más eficiente de todos y se debe a la fibra de carbono.

### **1.3. Alcance.**

#### **Análisis Teórico.**

Se trata de una introducción al diseño estructural de componentes aeronáuticos con materiales compuestos incluyendo los procesos automatizados para llevar a cabo la fabricación de componentes.

#### **Diseño y análisis de la máquina.**

Una vez conocidas las necesidades para crear el sistema automático de fabricación, diseñaremos en CAD cada uno de los componentes que compondrán la maquinaria.

Se analizará que componentes de la parte eléctrica y electrónica se deben usar ya que es necesario aportar energía y control a nuestro sistema del que se obtendrá también una configuración de elementos para nuestro CNC.

#### **Diseño y fabricación Prototipo.**

Podría decirse que la máquina de encintado de fibra de carbono tiene mucho de fabricación aditiva, es por eso que para crear el prototipo se usa como base una impresora 3D, la cual sufrirá algunas modificaciones para adaptarla a nuestro material.

En principio se pondrá en marcha la impresora 3D, cuyo CNC está basado en arduino, permitiéndonos fabricar piezas para la adaptación a la máquina de fibra de carbono; a continuación, se estudiará y adaptará la máquina a la fibra de carbono teniendo en cuenta el sistema de fabricación manual de piezas de este material.

#### **Desarrollo de la aplicación.**

En este punto se explica el procedimiento para llevar a cabo los movimientos de los ejes así como otros componentes, compuesto principalmente por programación.



## 2. ESTADO DEL ARTE

El mundo de la fabricación de materiales compuestos no es fácil de innovar, ni de llevar a cabo la construcción de máquinas especiales que cumplan con el propósito de fabricar en cadena piezas hechas con estos materiales. Sin embargo, pocas son las empresas que lo han conseguido como es el caso de la empresa **MTORRES**, los cuales poseen un gran arsenal de soluciones para la fabricación de fibra de carbono, sobre todo en el sector aeronáutico; cuenta con amplia experiencia en procesos automatizados que les permite gran flexibilidad a la hora de cambiar la estructura a un mecanismo ya conseguido y aplicarlo en otros sistemas.

Las principales herramientas con la que presentan este método de fabricación son ATL y AFP que no son más que encintadoras de material compuesto, estas máquinas aplican capas de material compuesto en tiras de fibra sobre un molde. Proporcionan una alta productividad y fiabilidad útiles sobre todo en e sector aeronáutico.



Figura 4:TORRES LAYUP

En pro de conseguir los objetivos de este trabajo, hacemos referencia a algunas de las patentes que fueron registradas por el fundador de la empresa, y en las cuales se basa todos los conocimientos que actualmente tiene la empresa.

## 2.1. Referencia Patentes Citadas.

Este trabajo ha basado el cabezal en dos patentes realizadas por la empresa Mtorres registradas en el departamento de patentes de Estados Unidos. En concreto las patentes número:

- **MULTI-APPLICATION HEAD FOR FIBRE STRIPS.**

**US 6.968.883 B2.** Publicada a fecha 29 de Noviembre del 2005.

Se trata de un cabezal para aplicación de múltiples tiras de fibra. Consiste en un porta-bobinas (1) en el propio cabezal que provee de tiras (2) para la aplicación en la superficie de aplicación (4), cada una de estas bobinas pasan a través de un peine guía (5) que conduce las bobinas al dispositivo de arrastre (7 y 8) que actúa y conduce sobre cada una de las tiras (3) hacia el área de aplicación.

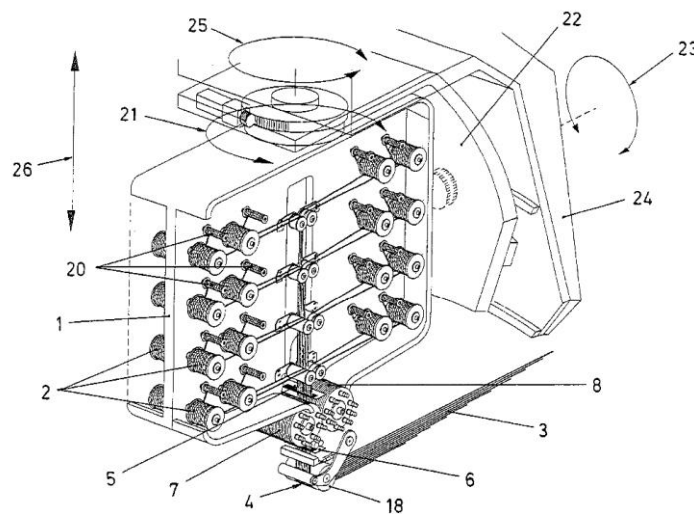


Figura 5: Patente US 6.968.883 B2. Manuel Torres.

En esta patente cabe destacar los rodillos de arrastre compuestos principalmente por “arandelas” que giran de forma independiente accionadas por motores como se muestra en la siguiente imagen.

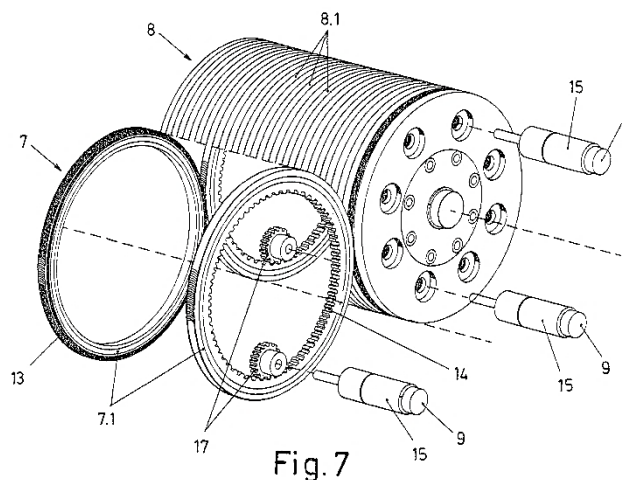
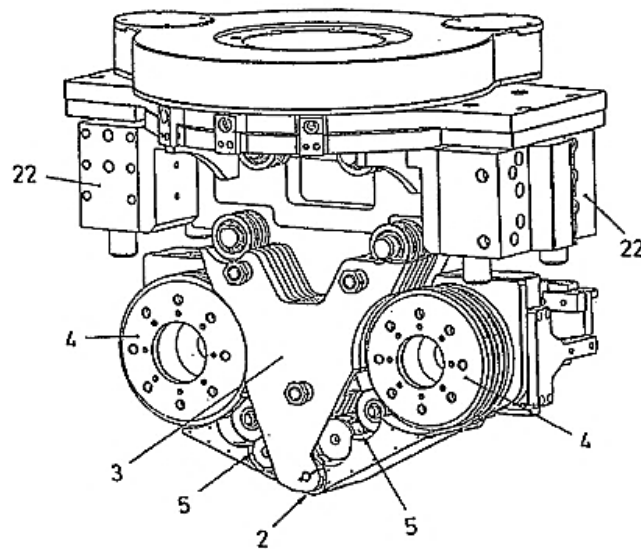


Figura 6: Rodillos de arrastre patente US 6.968.883 B2. Manuel Torres.

- **FIBER STRIP MULTIPLICATOR HEAD AND METHOD FOR APPLYING THE FIBER STRIPS.**

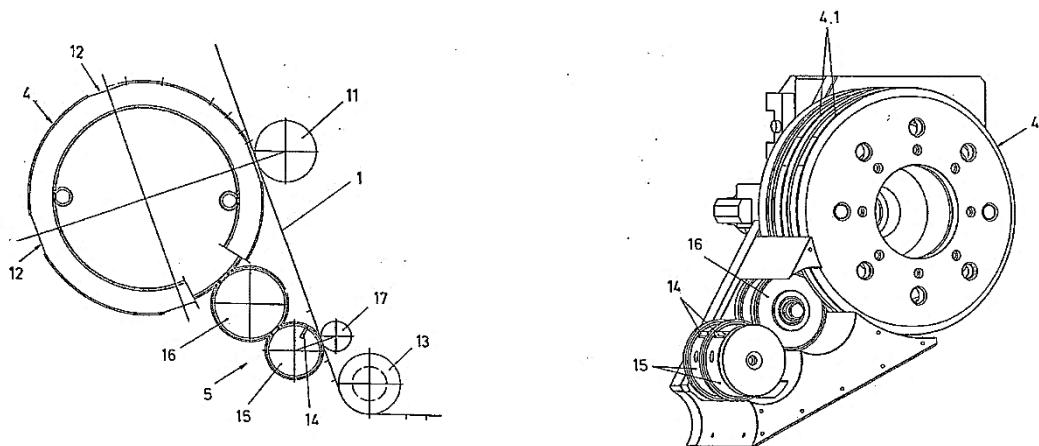
**US 2007/0234907 A1.** Publicada a fecha 11 de Octubre del 2007.

La patente hace referencia de igual forma a un cabezal aplicador de tiras de fibra de manera independiente, de igual forma se compacta conjuntamente en una zona (2) por medio de un rodillo, las fibras son conducidas a través de un cuerpo estructural (3), donde dos rodillos maestros (4) hacen de carro de arrastre de las tiras sincronizados con los respectivos sistemas de corte (5).



**Figura 7:** Patente US 2007/0234907 A1. Manuel Torres.

En esta patente cabe destacar la sincronización de los rodillos de arrastre maestro con los rodillos de corte, estos rodillos disponen de cuchillas que al ser accionadas cortan la fibra individualmente.



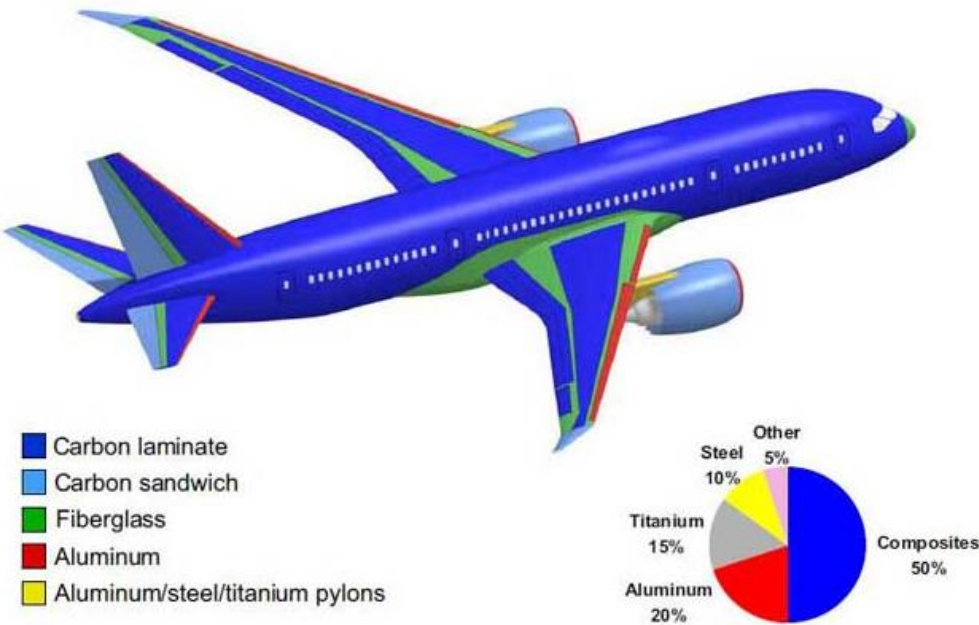
**Figura 8:** Rodillos de arrastre y de corte. Patente US 2007/0234907 A1. Manuel Torres.

### 3. ANÁLISIS TEÓRICO

#### 3.1. Materiales compuestos en Fabricación Aeronáutica.

##### 3.1.1. Introducción.

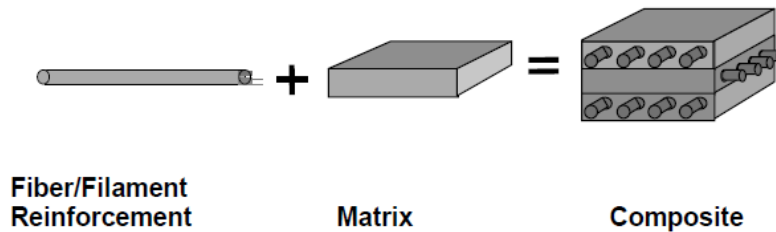
Actualmente la mayor parte de las piezas estructurales de un avión comercial, hecho en gran parte de material compuesto, se fabrican en fibra de carbono o bien de carbono con telas de kevlar. La fibra de vidrio se utiliza en estructuras secundarias (carenados, paneles hoenycomb, interiores...)



La gran ventaja que tiene los materiales compuestos sobre otros materiales se describe en la siguiente tabla. Cómo podemos observar la fibra de carbono en resina epoxi tiene una clara ventaja sobre el resto de materiales en este sector, con una resistencia a la tracción de 2000 MPa es decir un 66% más que el acero y una densidad 40% menor a la aleación de Aluminio-Litio.

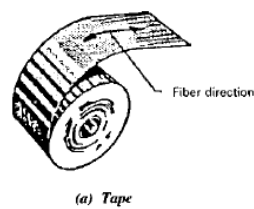
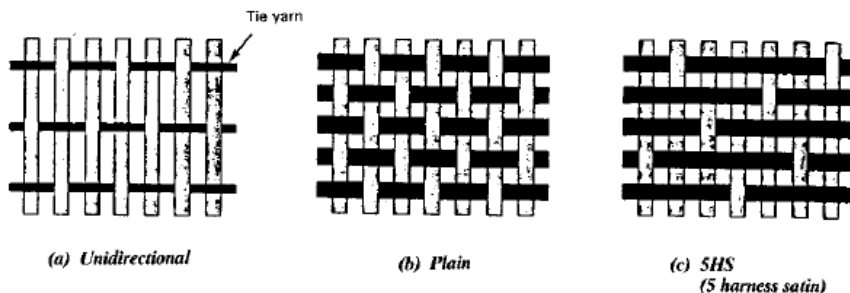
Semi-finished Product	Material	Material Designation	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Specific Strength Base: 2024
Sheet	Aluminium	2024 / 2524	2.78	420	1.00
		6013	2.71	360	0.88
		Al-Mg-Sc	2.65	370	0.92
		7475	2.80	460	1.09
		Al-Li (C47A)	2.64	460	1.15
	Titanium	Ti-6Al-4V	4.51	920	1.35
	Steel	15-5PH	7.81	1200	1.02
Component	CFRP	C-fibers in epoxy resin	1.59	2000	8.33

La fibra de carbono, básicamente se combina un tejido de hilos de carbono (refuerzo), el cual aporta flexibilidad y resistencia, con una resina termoestable (matriz), comúnmente de tipo epoxi, que se solidifica gracias a un agente endurecedor y actúa uniendo las fibras, protegiéndolas y transfiriendo la carga por todo el material; por su parte el agente de curado ayuda a convertir la resina en un plástico duro

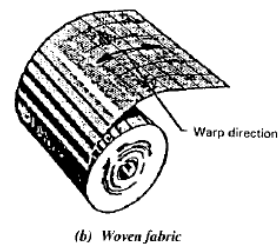


### 3.1.2. Orientación del laminado.

Los laminados se forman a partir del apilamiento de láminas, cada una de las cuales es una capa de resina fina de pequeño espesor reforzada con fibras. Existen dos tipos de láminas: de cinta o de tejido, que forman diferentes tipos de laminados según su orientación.



- Advantages of tape
  - Can be tailored more easily to match loads
  - Aerodynamically acceptable surface (requires less surface treatment than fabric)
  - No splice overlaps parallel to fibers
  - Less porous than fabric
  - Higher allowable strength and stiffness
  - Lower raw material cost
- Recommended for use where advantages justify increased fabrication costs, and where contours permit



- Advantages of fabric
  - Lower fabrication costs
  - Less material handling damage
  - Easier forming on contours and corners
  - More resistant to surface breakout and delamination
- An acceptable aerodynamic surface is harder to obtain on fabric than on tape

Figura 9: Tipos de fibras Materiales compuestos.

La principal característica de las láminas de cinta es que todas las fibras se encuentran orientadas en una única dirección y que presentan una isotropía transversal, es decir mismas propiedades mecánicas en direcciones perpendiculares a la fibra.

Los **laminados unidireccionales** se forman al apilar láminas de cinta, donde las fibras se encuentran orientadas en la misma dirección.

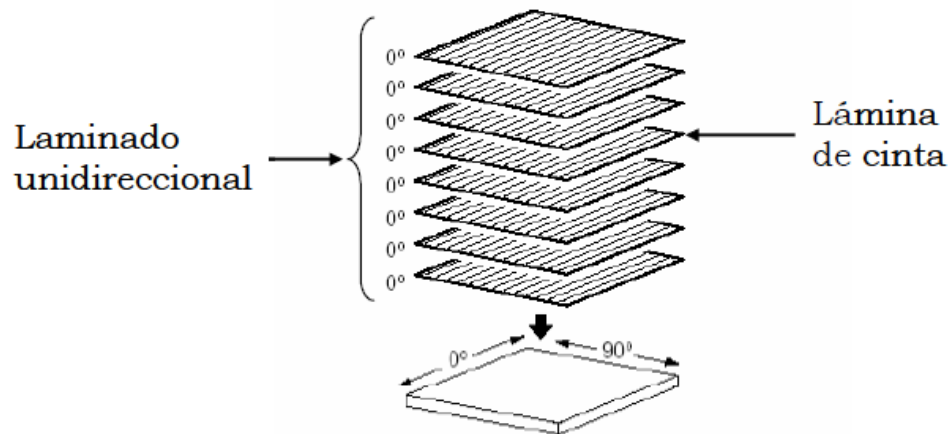


Figura 10: Ejemplo laminado unidireccional.

Los **laminados 0/90** se fabrican a partir del apilamiento de láminas de cinta en dos direcciones ortogonales, cuya principal característica es su comportamiento ortótropo, o diferentes propiedades mecánicas en cada uno de sus ejes ortogonales.

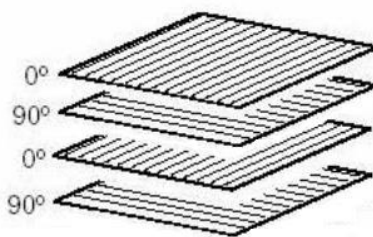


Figura 11: Ejemplo laminado 0/90

Los **laminados cuasi-isótropos** están fabricados a partir del apilamiento de láminas de cinta que se encuentran orientadas en diferentes direcciones ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ). Sus propiedades son aproximadamente las mismas en todas las direcciones, debido a las diferentes orientaciones en cada lámina.



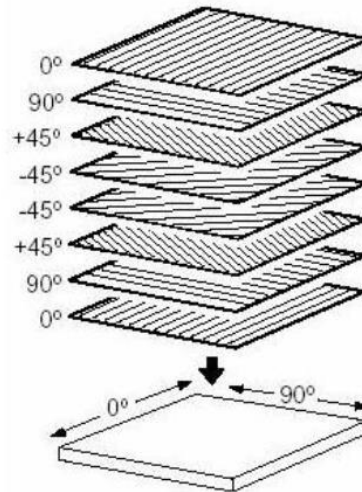


Figura 12: Ejemplo laminado cuasi-isótropo.

En **conclusión** los laminados unidireccionales, dependiendo de su orientación, podemos obtener tensiones a tracción muy elevadas, alrededor de 2400MPa y módulos de elasticidad de 170GPa en comparación con las fibras que vienen en tejidos. Esta configuración es la que más beneficios mecánicos nos puede aportar es por eso que se usará este tipo de laminado para la fabricación automática que se pretende en este trabajo.

### 3.1.3. Fibras pre-impregnadas

Los materiales preimpregnados consisten en fibras (refuerzos) impregnadas con una resina termoestable o termoplástica, en fase inicial de curado. En el caso de las resinas termoestables, su almacenamiento requiere temperaturas muy bajas ( $-18^{\circ}\text{C}$ ), haciendo su tiempo de vida limitado. Los ciclos de procesado-laminado se realizan con alta temperatura y presión, siendo la forma más sencilla de fabricación de los materiales.

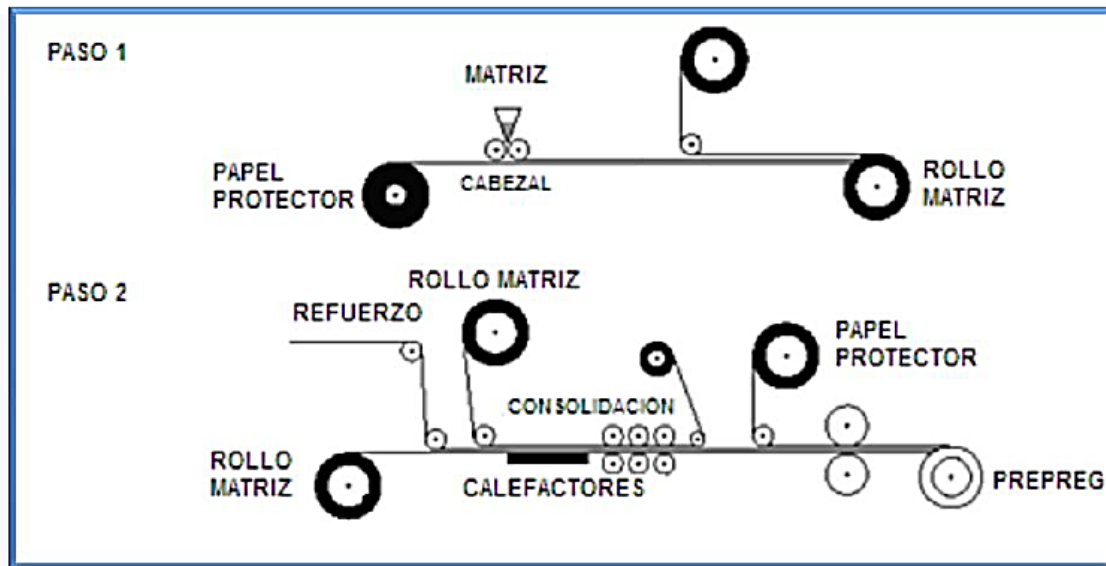


Figura 13. Proceso de pre-impregnado de fibras.

Su forma de fabricación más común es por encintado automático (Automated tape laying o ATL and Automated fiber placement o AFP) pero se puede realizar también manualmente (*hand lay up*); el curado se realiza en autoclave, aplicando tanto alta temperatura como presión. Es la forma de fabricación más sencilla de materiales compuestos.



Figura 14. Bobina de fibra de carbono pre-impregnada.



### 3.1.4. Honeycomb.

En el sector aeronáutico es muy común utilizar paneles estructura tipo sandwich o honeycomb llamado así por su apariencia hexagonal del núcleo. Los honeycomb más comunes son de Nomex (kevlar) y fibra de vidrio. Se integran en estructuras de fibra de vidrio o de carbono y se utilizan comunmente en zonas donde se requieran grandes sollicitaciones mecánicas, paneles del ala, spoilers, fan cowl, paneles suelo...En estas estructuras es crítico asegurar la estanqueidad ya que absorben agua aumentando el peso.

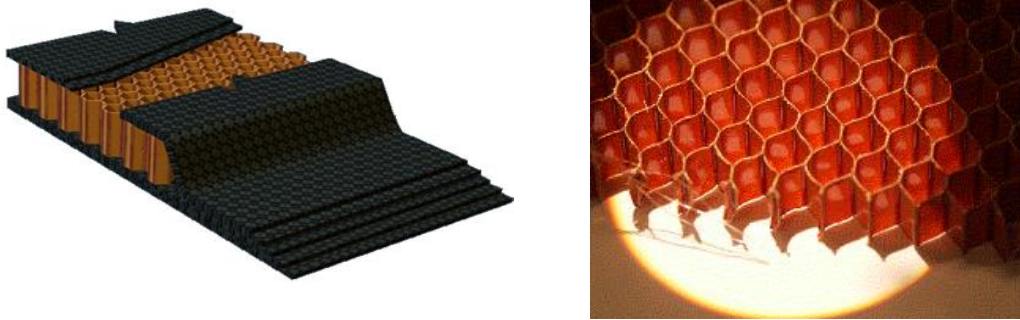


Figura 15: Panel Sandwich tipo Honeycomb.

Este compuesto principalmente por la piel, o revestimiento, hecho de láminas preimpregnadas de fibra de carbono; y por el núcleo de baja densidad más un adhesivo para unir las partes.

Estas estructuras soportan cargas a compresión y a tracción, tienen **excelente rigidez a flexión** y resistencia específica, resistencia y bajo peso. Si reemplazamos el centro con un núcleo de material estructural de baja densidad conseguimos aumentar su rigidez a flexión y resistencia.

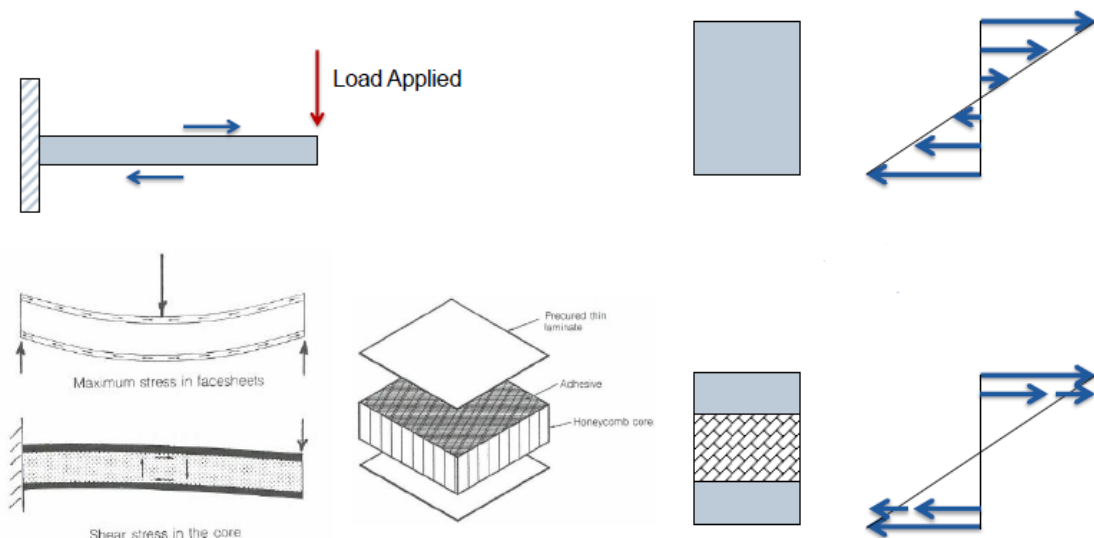


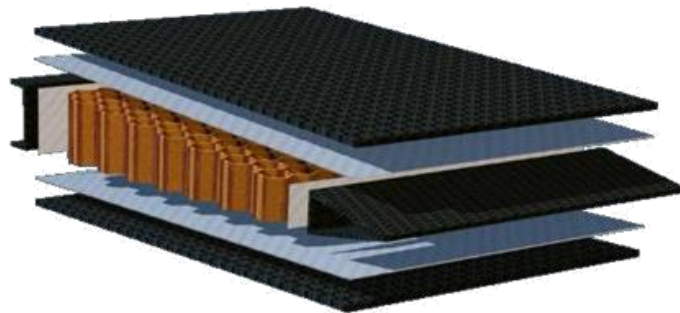
Figura 16. Rigidez a flexión de un panel tipo honeycomb.

Existen dos tipos de uniones de materiales compuestos.

- Proceso de co-curado (co-curing).- Consiste en cubrir la estructura hexagonal o núcleo con láminas de fibra y curarlas juntas hasta conseguir una pieza única.



- Proceso de co-pegado (secondary bonding).- Consiste en curar las láminas y piezas individualmente y en una segunda operación se coloca una capa de adhesivo entre ellos con el fin de unir las capas al núcleo.



## 3.2. Introducción componentes Aeronáuticos.

### 3.2.1. Cargas en aeronaves.

En el sector Aeronáutico, los materiales compuestos juegan un papel importante en el diseño estructural de la aeronave, principalmente porque aportan mejores beneficios en el cálculo de resistencia de las tensiones estructurales y así conseguir el correcto transporte de la carga. Al diseñar un avión, cada centímetro cuadrado de ala y fuselaje, cada ribet (costilla), cada larguero (spar) e incluso cada accesorio de metal debe considerarse en relación con las características físicas del material del que se fabrica. Cada parte de la aeronave debe ser planificada para resistir la carga que se le impone.

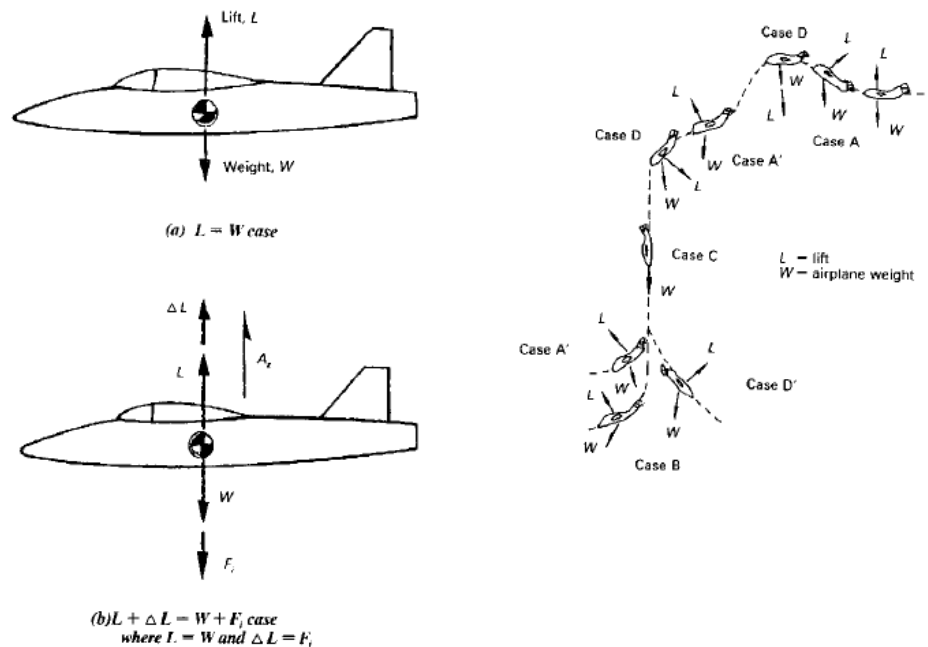


Figura 17: Ejemplo calculo factor de carga.

La determinación de tales cargas se llama análisis de tensión. Las cargas o fuerzas externas causan tensión. La tensión es la resistencia interna de un material, o contrapoder, que se opone a la deformación.

El grado de deformación de un material se llama strain. Cuando un material es sometido a una carga o fuerza, ese material se deforma, sin importar cuán fuerte sea el material o cuán ligera sea la carga.

Hay cinco tensiones principales a las que se someten todas las aeronaves:

- **Tensión**

La tensión es la presión que resiste a una fuerza que tiende a separar algo. El motor tira del avión hacia adelante, pero la resistencia del aire intenta retenerlo. El resultado es tensión que estira la aeronave.

- **Compresión**

La compresión es la tensión que resiste a una fuerza aplastante. La compresión es la presión que tiende a acortar o comprimir partes del avión.

- **Torsión**

Al mover el avión hacia adelante, el motor también tiende a girar a un lado, pero otros componentes de la aeronave se mantienen en curso. Así, se crea la torsión. La resistencia a la torsión de un material es su resistencia a la torsión o al par.

- **Cizalladura.**

Cizallamiento es el esfuerzo que resiste la fuerza que tiende a hacer que una capa de un material se deslice sobre una capa adyacente. Dos placas remachadas en tensión sujetan los remaches a una fuerza de corte. Normalmente, la resistencia al cizallamiento de un material es igual o menor que su resistencia a la tracción o fuerza compresiva. Las piezas de la aeronave, especialmente tornillos, pernos y remaches, a menudo están sujetas a una fuerza de corte.

- **Flexión.**

El esfuerzo de flexión es una combinación de compresión y tensión. La barra de la figura se ha acortado (comprimido) en el interior de la curva y estirado en el exterior de la curva.

### 3.2.2. Cargas en maniobras de vuelo.

Las maniobras de vuelo son a causa de desplazamientos, velocidades y aceleraciones resultado del movimiento de superficies de control. En muchas aeronaves existen restricciones en el pilotaje para evitar daños estructurales, pocos aviones están diseñados para un nivel de resistencia lo suficientemente alto como para sostener las cargas resultantes de maniobras extremas del piloto.

Son todas las maniobras que envuelve el movimiento y equilibrio a lo largo del eje vertical y lateral, ya sea resultado del movimiento de elevación o de vuelo. La siguiente figura podemos observar las fuerzas que se aplican y la distribución de presión variante típica de las maniobras de lanzamiento.

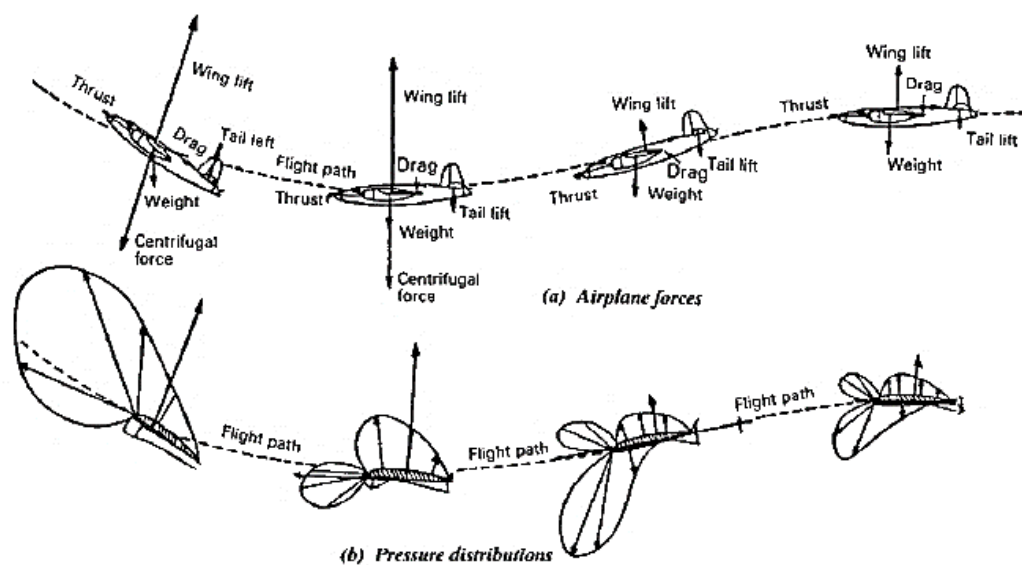


Figura 18: Maniobra típica de lanzamiento.

Por otro lado, tenemos la distribución de carga que soporta el ala, en la imagen podemos observar la distribución de presión que sufre cuando se realiza una maniobra de movimiento y giro.

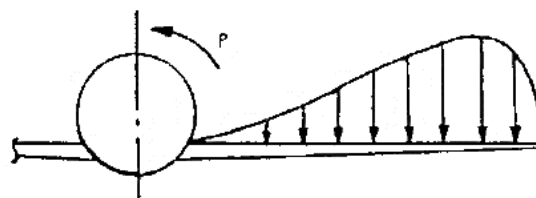


Figura 19: Distribución de presión en el ala.

En el fuselaje existen varios factores en el cálculo de cargas, tales como la distribución del peso para evitar inercias en causadas por las aceleraciones, la longitud por lo general es grande y esto puede contribuir a las flexiones del fuselaje, presiones elevadas externas en el vuelo (presurización) son usualmente significativas alrededor de protuberancias y en largas extensiones del fuselaje como se puede observar en la siguiente imagen.

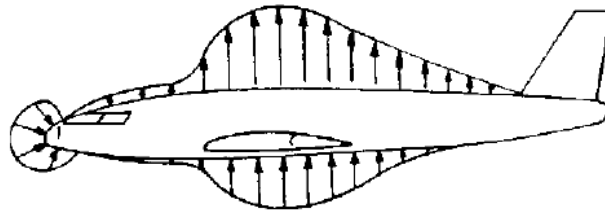


Figura 20: Distribución de presión en el fuselaje.

### **3.2.3. Partes de un avión.**

Un avión comercial consta principalmente de cuatro partes entre otras, el fuselaje, alas, estabilizadores y tren de aterrizaje.

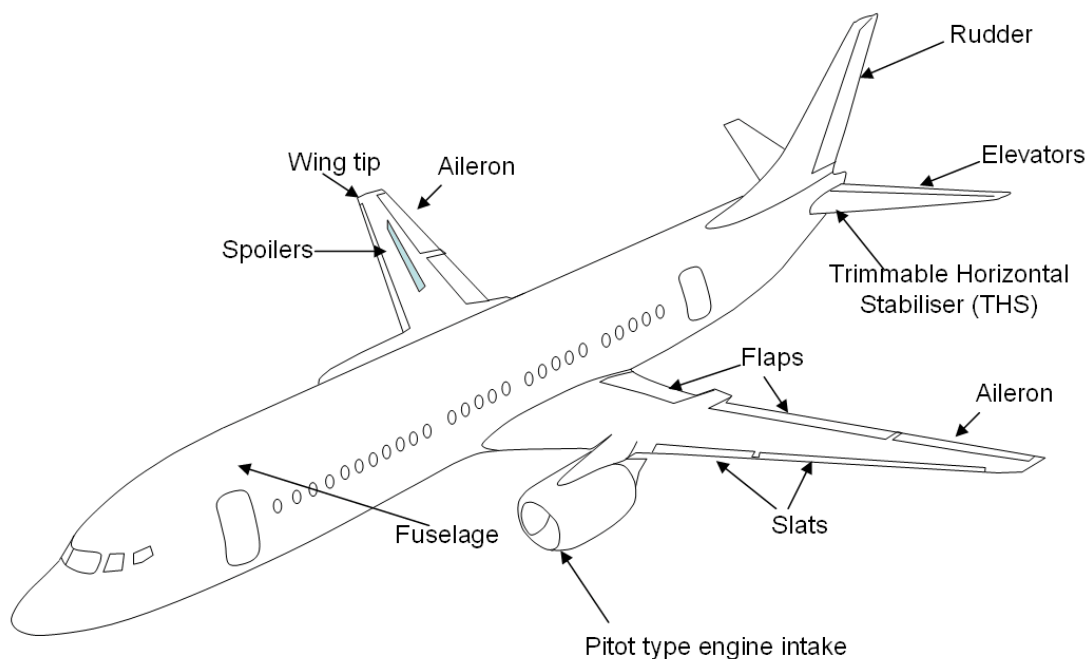
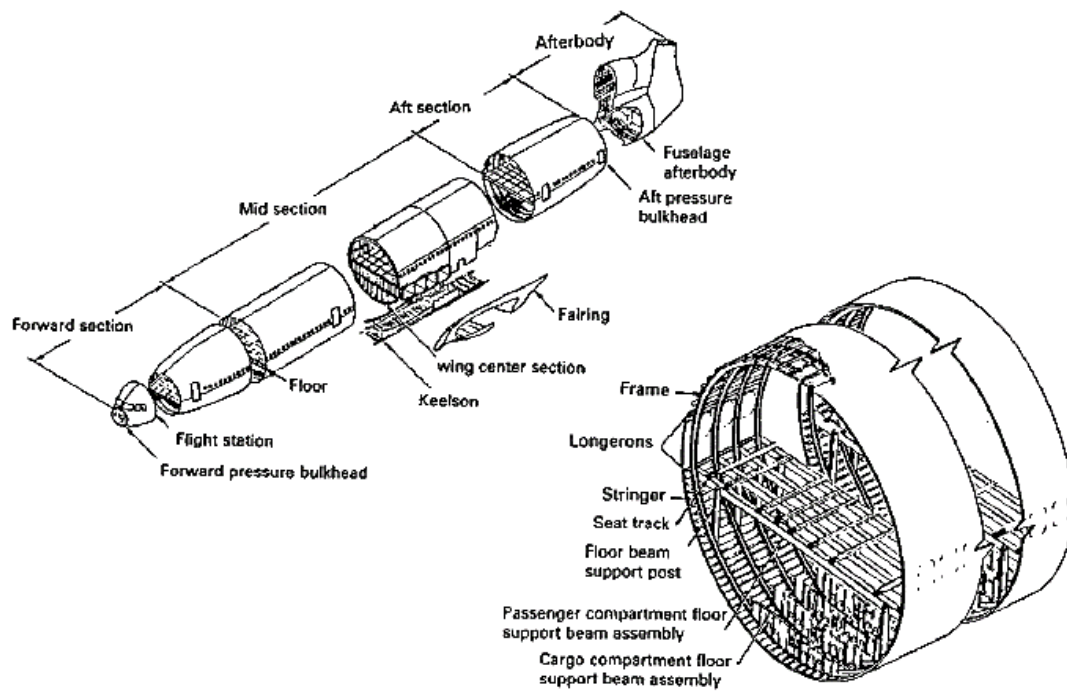


Figura 21: Partes de un avión comercial.

El fuselaje es la estructura principal o el cuerpo de la aeronave. Proporciona espacio para carga, controles, accesorios, pasajeros y etc. Estos son de dos tipos monocasco y semimonocasco. La principal diferencia entre estos dos radica en cómo se fabrican, en el caso de materiales compuestos los monocascos utilizan un único molde para fabricar el fuselaje, pero dado que ningún otro elemento de refuerzo está presente, es la “piel” la que debe soportar las tensiones primarias y mantener el fuselaje rígido, es difícil de fabricar.



Para superar el problema resistencia/peso de los fuselajes monocasco, se utilizan bastidores, bulkheads (maparas), y sobre todo largueros, para reforzar la pieza longitudinalmente y ayudan a los soportes primarios de la piel ante cargas a flexión.

Estos componentes están hechos típicamente de aleación de aluminio ya sea de una sola pieza o no. En la siguiente imagen podemos observar paneles de aluminio con stringers extruidos y frames de chapa doblada, y a la derecha tenemos el ensamblaje de estos paneles y el piso para conformar el denominado fuselaje.

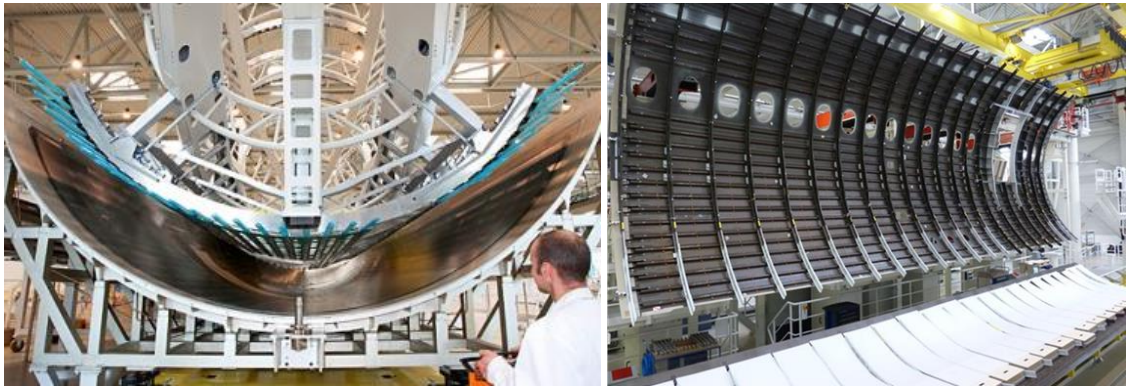


Figura 22. Paneles y ensamblaje de un fuselaje de aluminio.



En materiales compuestos también es posible obtener el fuselaje en seminocasco con sus framers, largueros, etc. Y es ahí donde interviene los procesos automatizados para obtener los procesos automatizados, en la obtención de las pieles.

Esta imagen muestra la instalación de stringers sobre un panel encintado previamente tratado al vacío y curado en autoclave obteniendo un panel en fibra de carbono.



**Figura 23. Panel y stringers en fibra de carbono para ensamblaje de fuselaje.**

A continuación se muestra un detalle de la unión del fuselaje del panel y parte del esmlado completo del fuselaje.





### **3.3. Procesos automáticos de fabricación materiales compuestos.**

Son procesos en que los apilados de material compuesto se realizan principalmente con fibra de carbono preimpregnada, de forma automática.

ATL aplica cintas de fibra (tejidos) mientras que AFP aplica haces de fibras (Rovings), la principal diferencia es que AFP tiene mejores aproximaciones geométricas incluso llega a efectuar curvas mientras que ATL permite aplicar una mayor superficie.

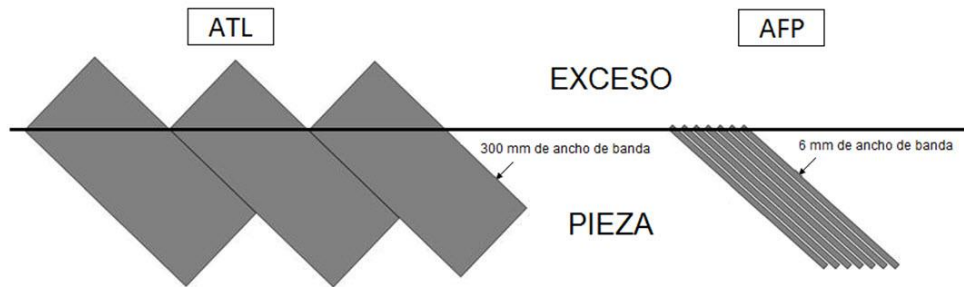


Figura 24: Diferencias laminado ATL y AFP.

#### **3.3.1. Encintado automático (ATL).**

El proceso de encintado automático o Automatic Tape Laying, emplea máquinas de control numérico, capaces de poner cintas unidireccionales (cinta de fibra de carbono unidireccional preimpregnada en epoxi con anchuras típicas de 75, 150 y 300 mm), con precisión tanto de posición como de orientación; sobre superficies planas o superficies ligeramente curvas.

El cabezal que porta el rollo de cinta, hace los cortes necesarios y separa el soporte de papel de la cinta a la vez que la aplica con presión sobre un molde. Influyen en la velocidad de laminado la anchura de la cinta, las orientaciones, la curvatura de la superficie del molde, el número de refuerzos locales o de pequeño tamaño, etc. Es muy importante el control de separaciones y solapes entre las diferentes cintas.



Figura 25: Maquinaria ATL de MTORRES.

Las curvaturas o cambios de pendiente en el molde, pueden provocar cambios de dirección en la cinta. Las máquinas más recientes incorporan un nuevo eje de control para poder dirigir la cinta en la dirección deseada y minimizar separaciones y solapes (steerin).

Una **aplicación** típica de este proceso consiste en la fabricación de laminados de varias capas de la cinta superpuesta con diferentes ángulos de orientación del refuerzo. Cada lámina consiste en la superposición de varias cintas a un ángulo dado. La superposición de láminas con diferente orientación de refuerzo permite obtener un laminado más resistente.

Este proceso habitualmente da lugar a la fabricación de alas, estabilizadores, alerones, flaps, etc. En definitiva perfiles con curvatura sencilla.

### **3.3.2.Posicionado de fibras (AFP).**

La tecnología de posicionado de fibras o fiber placement permite la automatización de laminación de materiales compuestos por haces de fibras. Es una tecnología que reúne las ventajas del bobinado de filamentos (filament winding) y ATL, resolviendo las limitaciones que tienen ambos métodos. Así es posible laminar automáticamente tanto en superficies cóncavas como convexas, cerradas o abiertas.

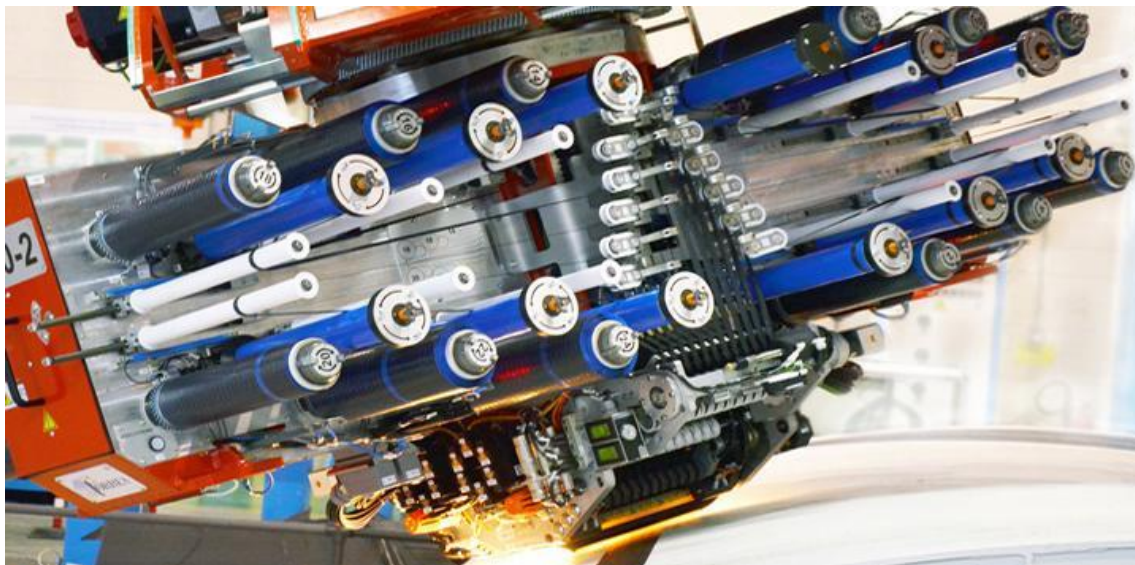


Figura 26: Maquinaria AFP de MTORRES.

La versatilidad de estas máquinas es debido a que el material se deposita sobre la superficie del útil, siendo posible el corte y la realimentación del mismo de una forma automática. Tienen varios grados de libertad adicional a las máquinas de encintado automático. En lugar de una cinta única son capaces de controlar independientemente un gran número de cintas o haces de fibras de pequeña anchura (3 a 6 mm).

La cinta o tows se depositan sobre un eje cuyo giro es controlado por la propia máquina. Con la configuración especial del rodillo compactador pueden depositar cintas sobre superficies complejas y de doble curvatura.

Suele ser utilizado para realizar piezas que requieren un perfil curvo, anillos, tapas de motores, fuselaje, etc. Al igual que mediante este proceso, se pueden realizar todos los que se realizan en ATL.

### **3.3.3.Diferencias en los procesos.**

La diferencia entre los dos procesos son las siguientes:

- En ATL, tanto el proceso como la acumulación del material, se lleva a cabo a temperatura ambiente, mientras que en el proceso de AFP, el material se encuentra a 5-6°C de temperatura.
- En ATL el material se presenta en una cinta en un rodillo, y en AFP, son varios rodillos con mechas que componen las tiras de material a través del cabezal por anchuras.
- La pegajosidad que se consigue con el ATL, es mejor que la que se obtiene en el caso del AFP, ya que depende de la temperatura del material, y a temperatura ambiente se obtienen mejores resultados en este aspecto.
- Todos los procesos que se realizan en ATL (perfiles de curvatura sencilla), puede realizarlos la AFP, pero no ocurre de igual manera en el caso contrario.

### **3.4. Análisis de necesidades.**

Una vez analizado el material compuesto, los procesos de laminado y los procesos de fabricación se obtienen las siguientes conclusiones:

- La fibra de carbono tiene grandes módulos de resistencia y de elasticidad si son tratadas como fibras unidireccionales y de gran longitud.
- El laminado en diferentes direcciones le aporta al producto final mejores propiedades mecánicas independientemente del plano ortogonal del que provenga la fuerza de tracción.
- El usar fibras pre-impregnadas facilita el proceso de fabricación.
- El proceso automático de posicionado de fibras AFP nos permite más aplicaciones geométricas, incluso circulares, y con menor desperdicio de material.

De este análisis obtenemos las siguientes necesidades de las que se parten para fabricar la maquina:

- El trabajo se centrará en fabricar una máquina para el apilamiento de láminas formadas por haces de fibra unidireccionales de diferente dirección.
- Para ello se creará una máquina de posicionado de fibras AFP la cual será capaz aplicar ligeras curvas en el plano de aplicación
- El material que se usará serán haces de fibra pre-impregnadas, las mismas que deberán ser reactivadas por aplicación directa de calor en el área de aplicación.

### 3.5. Análisis de la solución.

#### 3.5.1. Descripción del proceso.

Este trabajo se basa fundamental en el proceso automatizado de aplicación de tiras de fibra AFP; si disponemos de un control de ejes que nos permita usar un considerable número de tiras se puede cubrir en un mínimo de pasadas la superficie de aplicación. Al tratarse de esta tecnología nos permite un mejor control de la cantidad de material que se aplica permitiendo aplicar en superficies irregulares, bordes oblicuos, etc. De manera que se puede cubrir la mayor superficie con un mínimo de desperdicio de material en cada pasada gracias al control independiente de cada tira.

Es por eso que se centrará en el diseño del cabezal que es el que aplica las tiras de fibras de carbono sobre un área de aplicación. Para aplicar las fibras de carbono uniformemente necesitamos que nuestra máquina cumpla con una serie de condiciones:

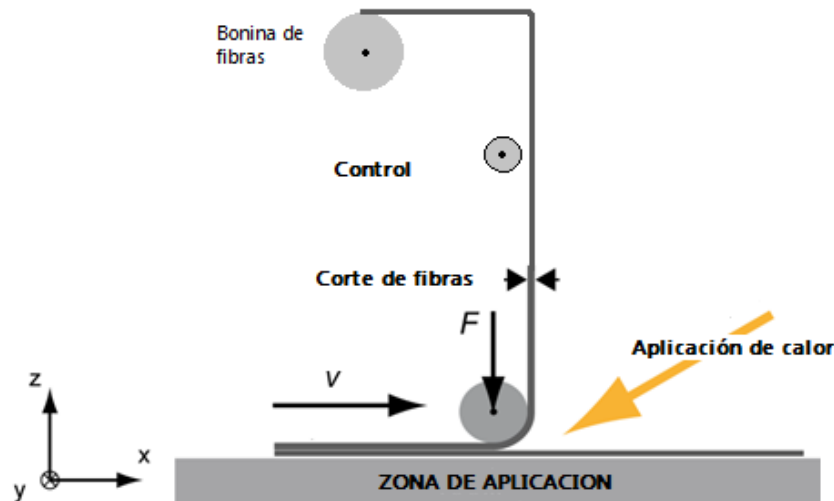


Figura 27: Descripción del proceso de aplicación de un AFP.

1. Para la aplicación se debe mover en los tres ejes de coordenadas cartesianas.
2. Se debe aportar un número considerable de haces de fibra para crear una superficie de aplicación (ancho) considerable.
3. La posición de las bobinas de haces de fibra debe ser tal que no interrumpa con el funcionamiento del cabezal.
4. Se debe controlar cada haz de fibras de manera independiente para poder aplicar haces de fibra en superficies irregulares.
5. Se debe aplicar una fuerza en el área de aplicación.
6. Además, se debe aplicar aire caliente en la superficie de aplicación para activar el catalizador que acelera el proceso de endurecimiento de la matriz que lleva en si el material pre-impregnado.
7. Colocar un sistema de corte de las fibras para continuar con el proceso de laminado.

## 4. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

### 4.1. Estructura.

Una máquina AFP convencional consta de un sistema de movimiento tipo Gantry, se mueve en los ejes X, Y, Z pudiendo añadir más ejes. Esta estructura esta soportada sobre patines y guías. Así como del utillaje necesario para llevar a cabo el encintado de la pieza, tales como moldes, abrazaderas, etc.



Figura 28: Máquina de encintado automático tipo Gantry. MAG's Composite.

En este caso simularemos una estructura tipo gantry con los elementos necesarios de una impresora 3D convencional modelo PRUSA i3.

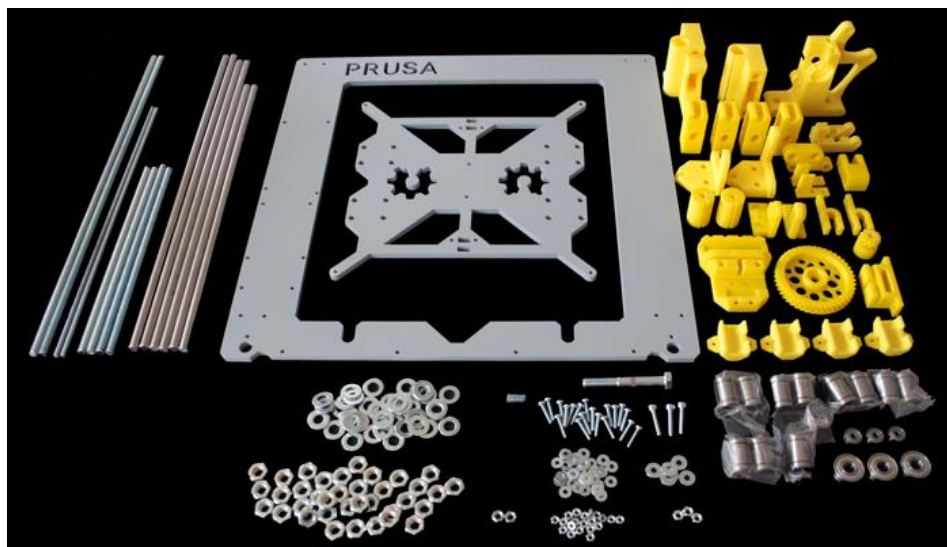


Figura 29: Material impresora 3D Prusa i3.

La estructura está compuesta en su mayoría de metacrilato con partes impresas en ABS para la unión de los componentes. Tanto el eje Y como el eje X transmiten el movimiento a través de una correa dentada y rodamientos sobre dos varillas lisas, mientras que el eje



Z utiliza dos motores en tándem y varillas roscadas a modo de tuerca y usillo para desplazar el carro del eje X.

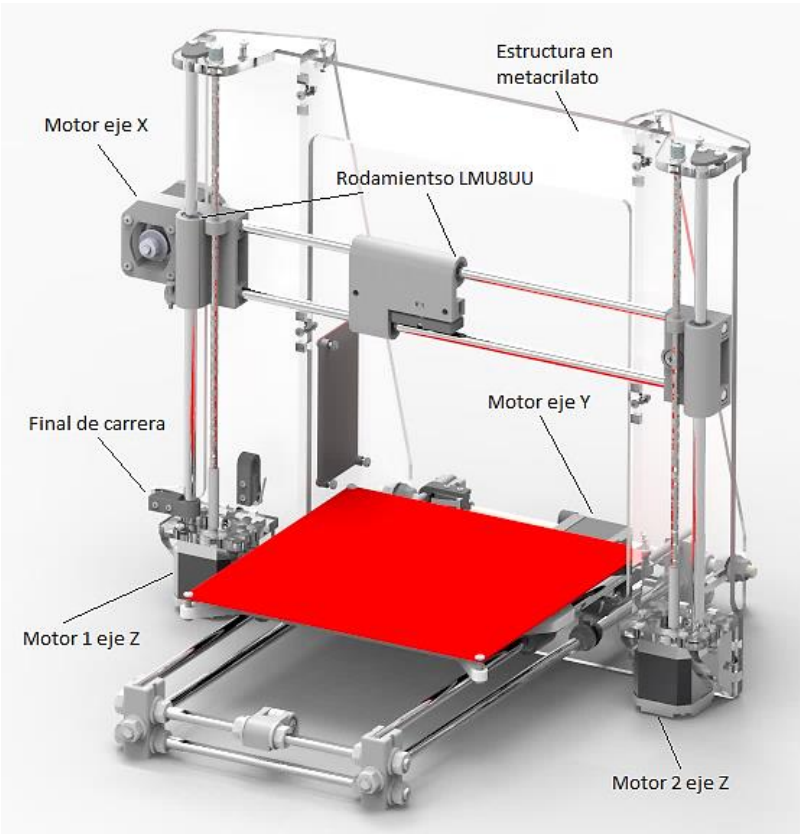


Figura 30: Montaje de la estructura de la impresora 3D

A continuación, se describe la lista de elementos que componen la estructura.

Estructura Mecánica			
Cant.	Elemento	Cant.	Elemento
	<b>Varillas Roscadas</b>	1	Marco de Metacrilato modelo prusa i3
2	Métrica 10 (380mm)	1	Juego de piezas impresas modelo prusa i3
4	Métrica 8 (210mm)	2	Correas GT2
2	Métrica 5 (295mm)	2	Poleas GT2
	<b>Varillas Lisas</b>	10	Rodamiento LM8UU
2	Métrica 8 (345mm) EJE Y	2	Acoples eje Z
2	Métrica 8 (320mm) EJE Z	3	Motor Nema 17
2	Métrica 8 (380mm) EJE X		
1	Métrica 8 (20mm)		

## 4.2. CNC y Accionamientos

El corazón de un accionamiento de control de movimiento o Motion Control, es por mucho el control numérico por ordenador o CNC, cuyo lenguaje de programación es idéntico al de un PLC y compatible con el lenguaje ISO de un centro de mecanizado convencional. Consta principalmente de:

- PC y PLC .- Es el que controla los movimientos, traduce el lenguaje escrito en código Ladder a código G.
- Servocontroladores.- Son mecanismos que controlan la maniobra y la potencia de los servomotores, a la vez hacen de amplificador de señales.
- Servomotores.- Son motores de corriente continua cuyo movimiento se controla en todo momento por un encóder que lleva incorporado conociendo así tanto su posición relativa como absoluta.



Figura 31: Ejemplo CNC Fanuc

En este caso se usa la opción de un Arduino como controlador más una placa controladora de potencia o Shield. La configuración será la siguiente:

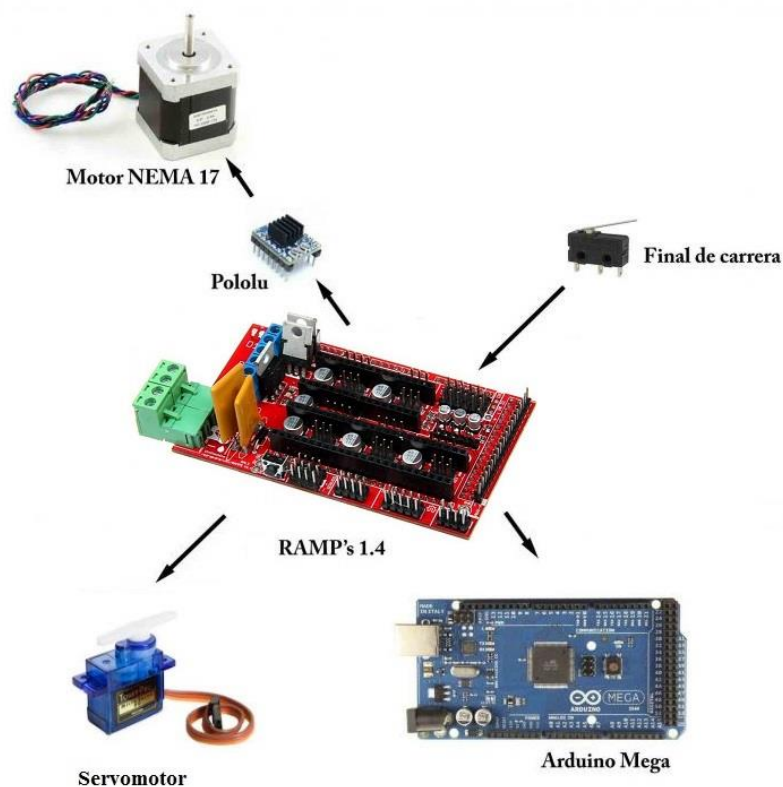


Figura 32: Configuración de la placa controladora.



La siguiente tabla muestra la lista de materiales.

Electrónica	
Cant.	Elemento
1	Arduino Mega
1	Ramps 1.4 (Controlador)
5	Pololu + disipador (Drivers)
1	Fuente de alimentación 12v. (al menos de 20A)
3	Finales de carrera
5	Motores NEMA 17 (motores paso a paso)
4	Servomotor SG90
1	Ventilador (electrónica)
1	Cableado

### Arduino (controlador)

Arduino va a ser la placa que controle y ejecute todos los movimientos del CNC, con la programación de un firmware específico; en este caso se emplea un Arduino Mega 2560, ya que tanto por la extensión del programa que se le carga, como por la gran cantidad de entradas / salidas que necesitamos, esto no se podría hacer con otra placa Arduino.

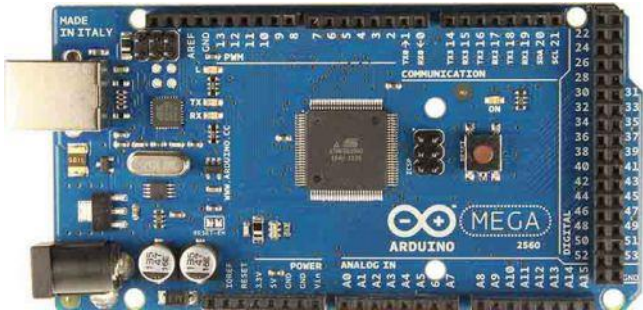


Figura 33: Arduino mega 250.

La placa Arduino puede funcionar de dos maneras, recibiendo y ejecutando la información que le llega directamente del ordenador a través del puerto USB o de manera autónoma leyendo los datos que le carguemos en una pantalla LCD mediante una tarjeta SD.

## RAMP's 1.4 (control etapa potencia)

La RAMP's 1.4 es el shield que le vamos a colocar a nuestro Arduino y que nos va a permitir controlar los elementos de potencia sin peligro de dañar el Arduino.

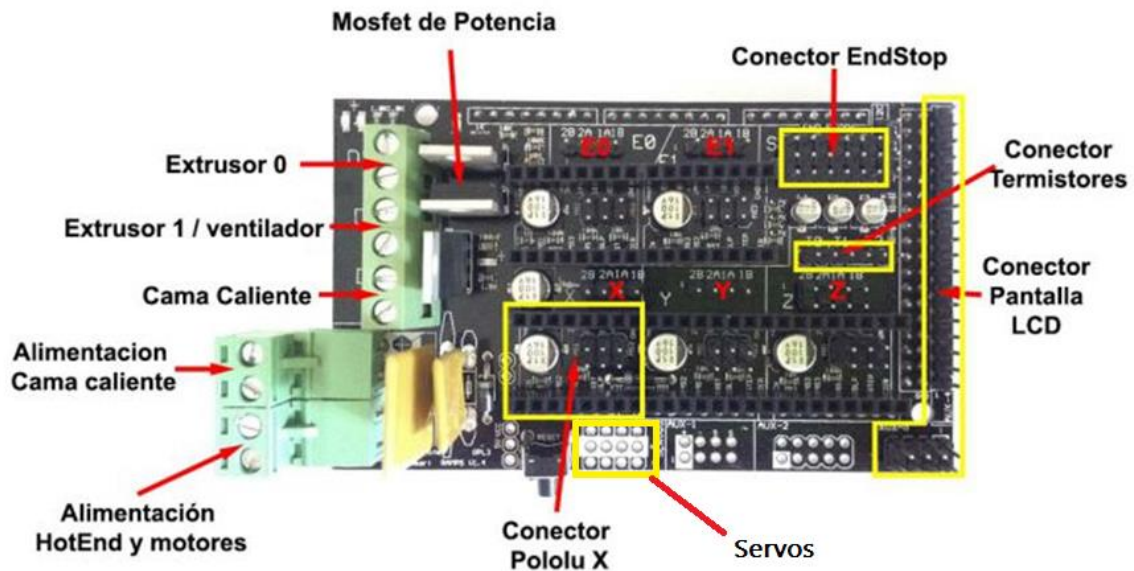


Figura 34: Conectores que conforman la ramps 1.4

En la imagen se describe de manera detallada todos los conectores y elementos que conforman la RAMP 1.4.

Como elementos más destacados, podemos ver que hay espacio para:

- Conector de Pololus o driver's que gestionaran la potencia que se le entrega a los motores paso a paso, usados para mover los tres ejes cartesianos y los dos extrusores, (5ejes).
- 4 conectores para servomotores (que los usaremos para el cabezal de la AFP).
- Diferentes pines donde conectaremos tanto los sensores de temperatura como los finales de carrera, etc.

## Pololu (drivers de potencia)

El Pololu es un driver que gestiona la potencia que se entrega al motor, este driver, va "pinchado" directamente sobre la RAMP's y regulará la corriente que se entrega al motor mediante la variación de un potenciómetro que tiene el mismo.

Existen varios modelos de pololus aquí usaremos el de 1 potenciómetro basado en el modelo A4988.

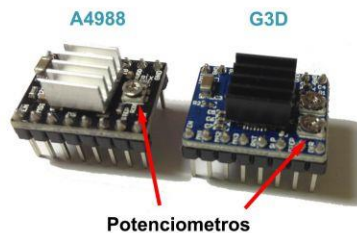


Figura 35: Drivers de potencia marca Pololu.

Es necesario ajustar la corriente que aporta cada uno de estos drivers para que dé nada más que la que necesitan los motores, en este caso los motores paso a paso nema 17 consumen no más de 1,7A.

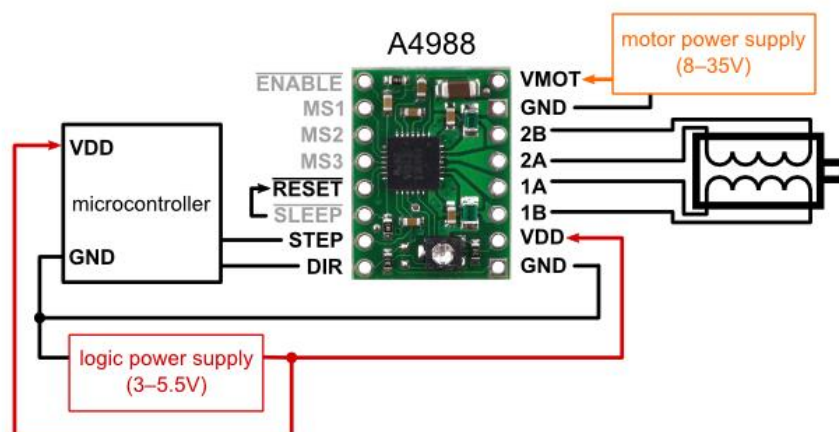


Figura 36: Representación esquemática de la conexión.

Esquemáticamente el driver viene dado por la figura, se usa controlar los motores paso a paso mediante una entrada de señal pulsada cuadrada a su entrada que determina el número de impulsos al que girará el motor, es complicado de explicar pero en resumen se trata de controlar las dos bobinas del motor mediante dos puentes en H.

## Motor NEMA 17 (motor paso a paso)

El motor NEMA 17 es el motor paso a paso más extendido y utilizado para la creación de impresoras 3D, debido a su robustez y a que tiene fuerza más que suficiente, alrededor de 3.2Kg/cm, para mover los ejes XYZ; es muy fácil de encontrar a un precio más que razonable.

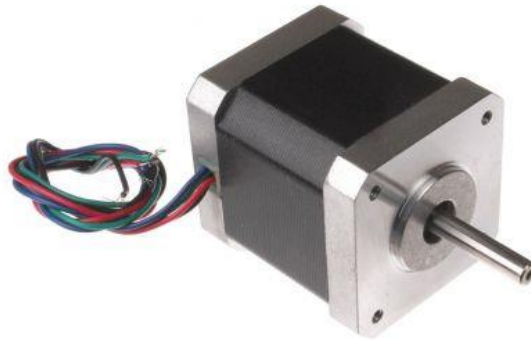


Figura 37: Motor paso a paso nema 17.

Este motor es un motor paso a paso bipolar con la capacidad de dar 200 pasos por vuelta, al exterior saca 4 hilos que dan acceso a las 2 bobinas que tiene internamente.

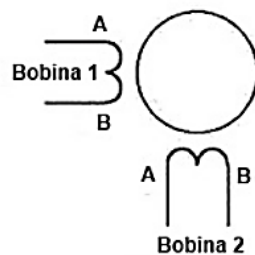


Figura 38: Esquema motor paso a paso bipolar.

Los motores paso a paso (stepper motors) son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el segundo caso ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

Si una o más de sus bobinas está energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

## Servomotor SG90

Los servomotores son motores de corriente continua (CC), pero en lugar tener un giro continuo que podamos aprovechar, están preparados para moverse a un ángulo fijo en respuesta a una señal de control, y mantenerse fijos en dicha posición. Vamos a utilizar estos motores en el tren de arrastre del cabezal para mover las fibras hasta la posición de aplicación.

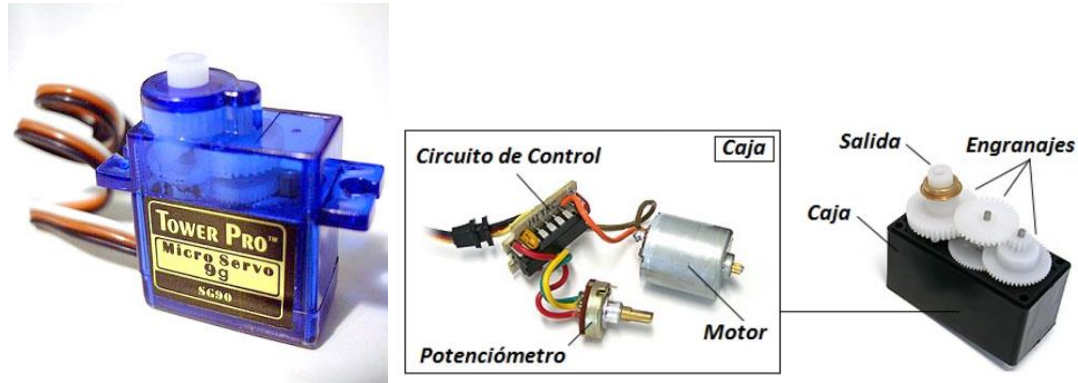
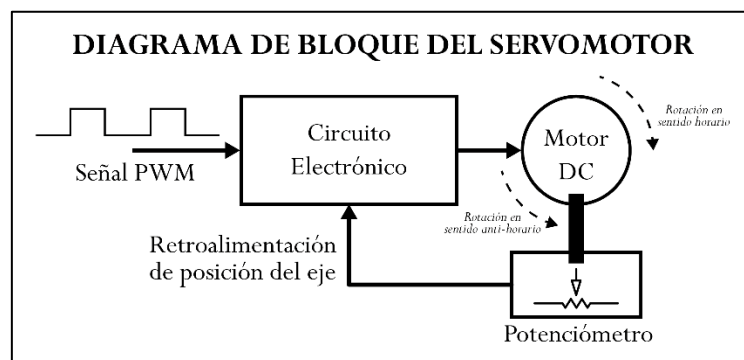


Figura 39. Servomotor SG90.

Un servo principalmente está formado por un conjunto reductor (engranajes), un motor de CC y por último por un circuito de control, aunque en la práctica se comporta como un bloque funcional que posiciona su eje en un ángulo preciso en función de la señal de control.

Habitualmente el servomotor tiene un margen de operación, es decir, pueden moverse entre  $0^\circ$  y ángulo dado, que suele ser de  $180^\circ$ . Normalmente estos pequeños servos funcionan sobre 5V y el control se realiza mediante una señal de control PWM, en la que el ancho el pulso indica el ángulo que deseamos que adopte el eje.



En este proyecto el servomotor sufre un ligero cambio que nos permitirá moverlo  $360^\circ$  y no  $180^\circ$  para que de esta forma tener un aporte de fibra continuo.

### 4.3. Diseño del cabezal v1.0

El objetivo principal que tiene el cabezal de encintado, es el de arrastrar las fibras de carbono hasta el punto de aplicación, con el adecuado sistema de control de desbobinado del plástico de las mismas y el tensado de cada fibra.

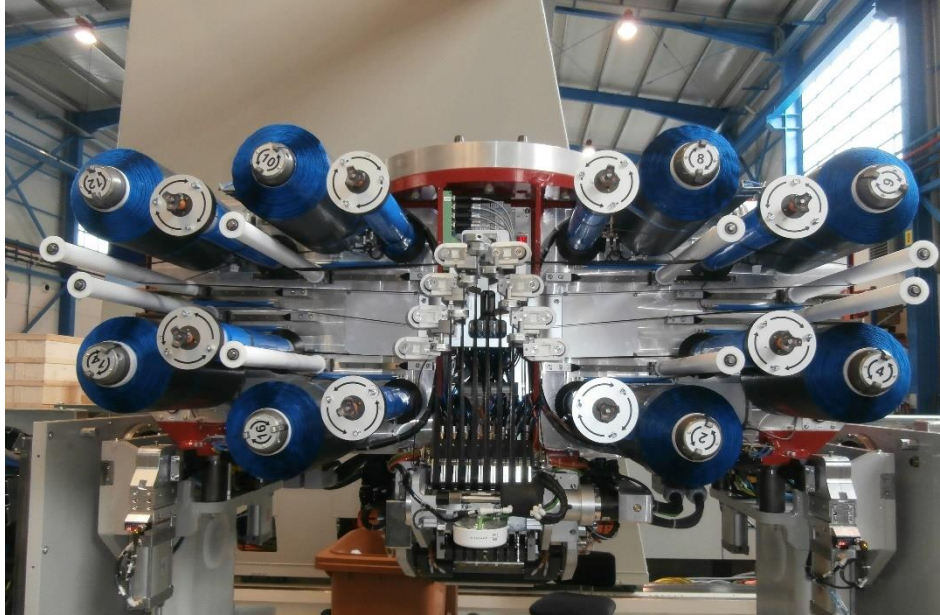


Figura 40. Cabezal AFP o Automated Fiber Placement MTORRES.

Por lo tanto, la primera necesidad que surge es la de diseñar el tren de arrastre de las fibras hasta el lugar de aplicación, para ello usaremos los servomotores y una serie de rodamientos para empujar la fibra hasta el punto de aplicación.

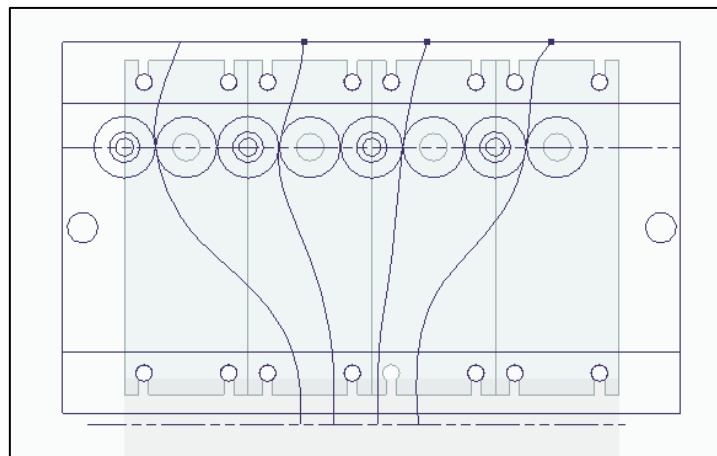


Figura 41: Boceto tren de arrastre V1.0

El diseño de esta pieza viene regido por la tipo de fabricación, como en este trabajo se va usar una impresora 3D para obtener el prototipo, es necesario tener una serie de condiciones:



- El cabezal debe ser diseñado en una única pieza dentro de lo posible para evitar ensamblar muchas piezas.
- El diseño debe ser tal que nos permite unir las piezas con tonillos, etc.
- No se debe diseñar voladizos, debido a problemas en el aporte de material, o en su defecto colocar soportes que luego serán retirados cuidadosamente de la pieza final.

Cómo podemos ver en la siguiente imagen, al contar con 4 salidas para servomotores en la tarjeta de control de potencia RAMPS, podremos aplicar hasta 4 tiras de fibra.

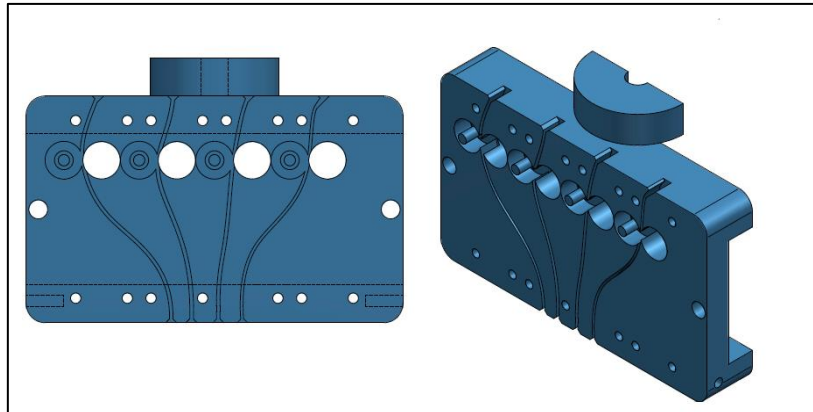


Figura 42. Soporte tren de arrastre.

El siguiente paso es diseñar el eje C de la máquina que nos permitirá girar el eje en Z, las tapas, el peine y rodillos de aplicación.

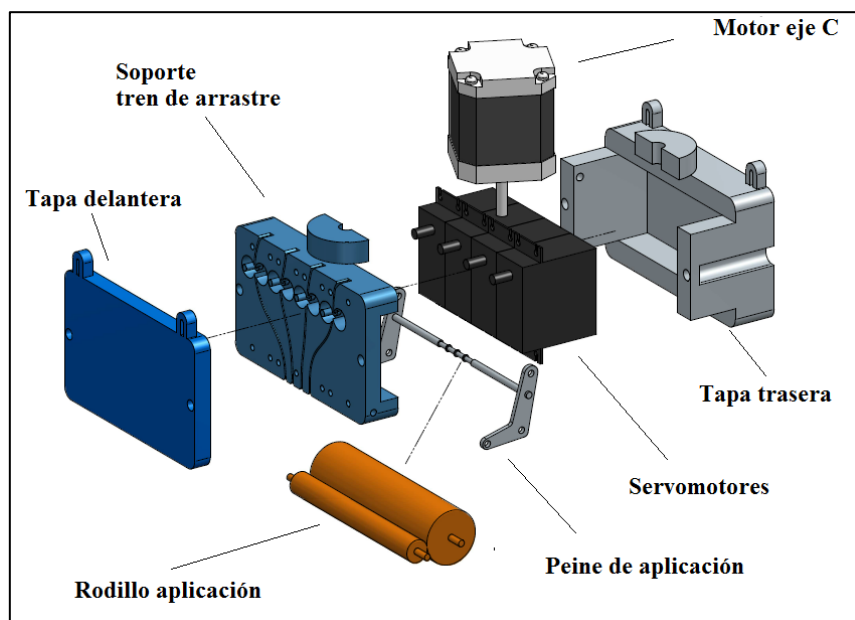


Figura 43. Tren de arrastre v1.0

Una vez montado el cabezal en la máquina podemos observar la necesidad de economizar el espacio, puesto que aún se necesita el portador de bobinas, el aplicador de calor, el sistema de corte de la fibra, etc.

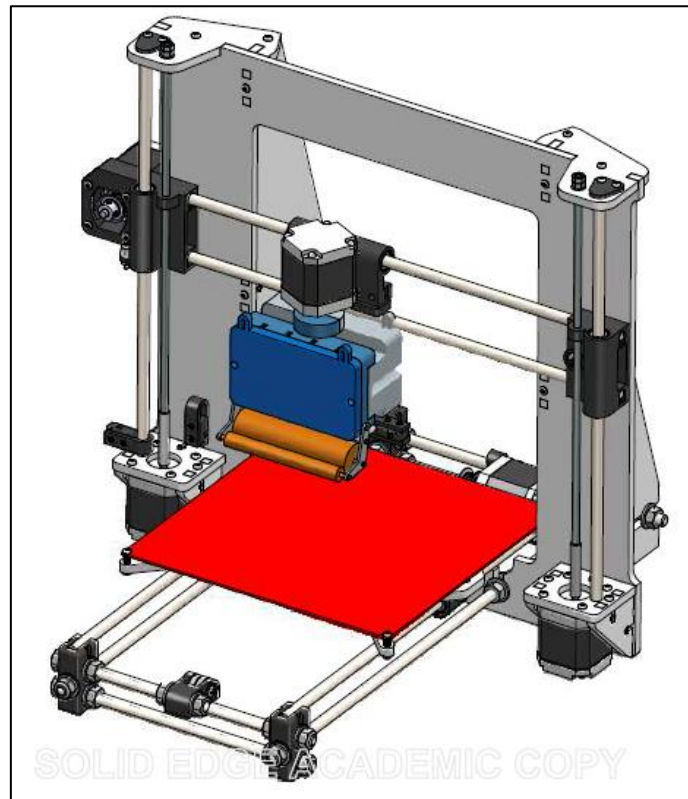


Figura 44. Cabezal de aplicación v1.0 montado sobre la estructura.



#### 4.4. Diseño del cabezal v2.0

El nuevo cabezal es un sistema basado en la patente número **US 2007/0234907 A1**. Que consta básicamente en un sistema sincronizado para el arrastre de la fibra compuesto por dos rodillos de arrastre que incluye un sistema de corte (15) que corta la fibra presionándola contra la sufridera (17), cuando no está cortando, este sistema ayuda la fibra a llegar hasta el punto de aplicación (13) y a partir de ahí es el rodillo de aplicación el que arrastra la fibra hasta que un nuevo ciclo de corte inicia.

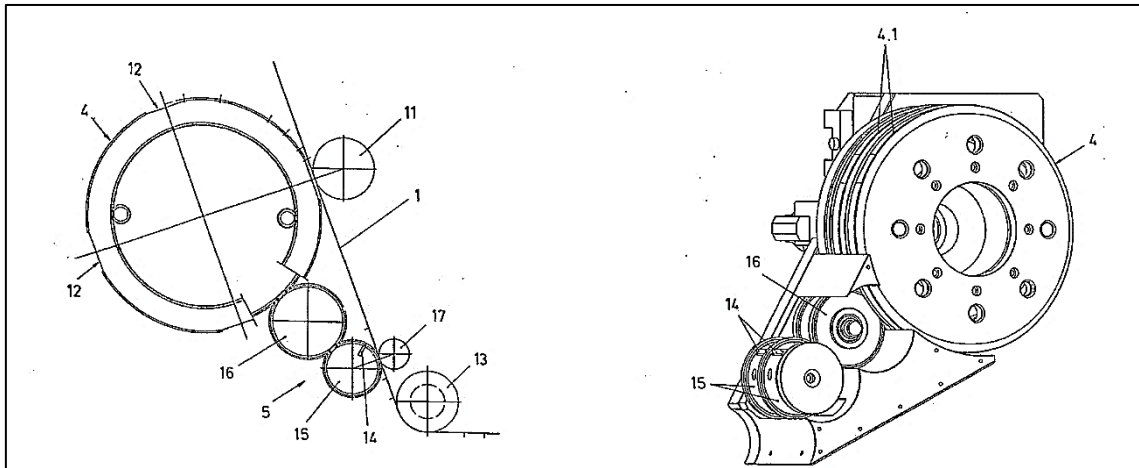


Figura 45: Rodillos de arrastre y de corte. Patente US 2007/0234907 A1. Manuel Torres.

Por lo tanto, el diseño del cabezal quedaría de la siguiente manera.

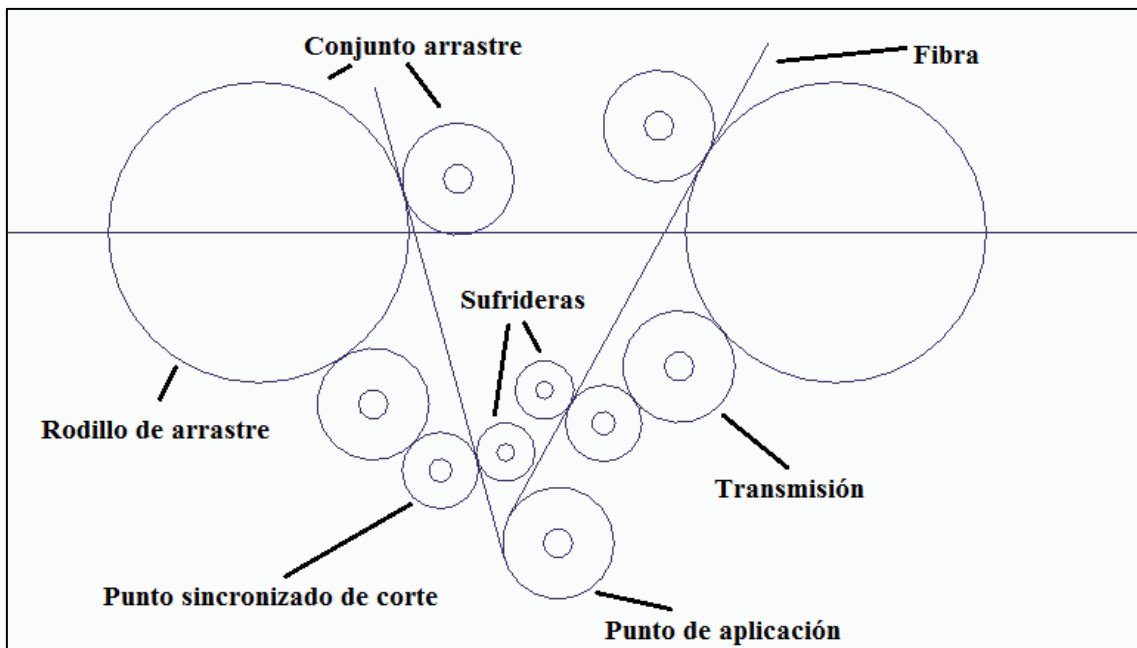


Figura 46. Boceto cabezal v2.0

Una vez vistas las necesidades el diseño tendría que dotar de los compartimentos adecuados para albergar los mecanismos de movimiento. También se añadiría el porta-bobinas en la parte superior y el soporte donde iría colocado el calefactor de las fibras.

Las tiras pre-impregnadas de fibra de carbono llevan un recubrimiento plástico para evitar que las tiras se peguen entre sí, el cabezal debería contemplar un desbobinador controlado para dicho plástico y el estiramiento de las fibras para evitar el mismo efecto, dentro de un mismo lazo de control, este sistema no se contempla en este trabajo puesto que se usarán únicamente tiras de fibra de carbono secas.

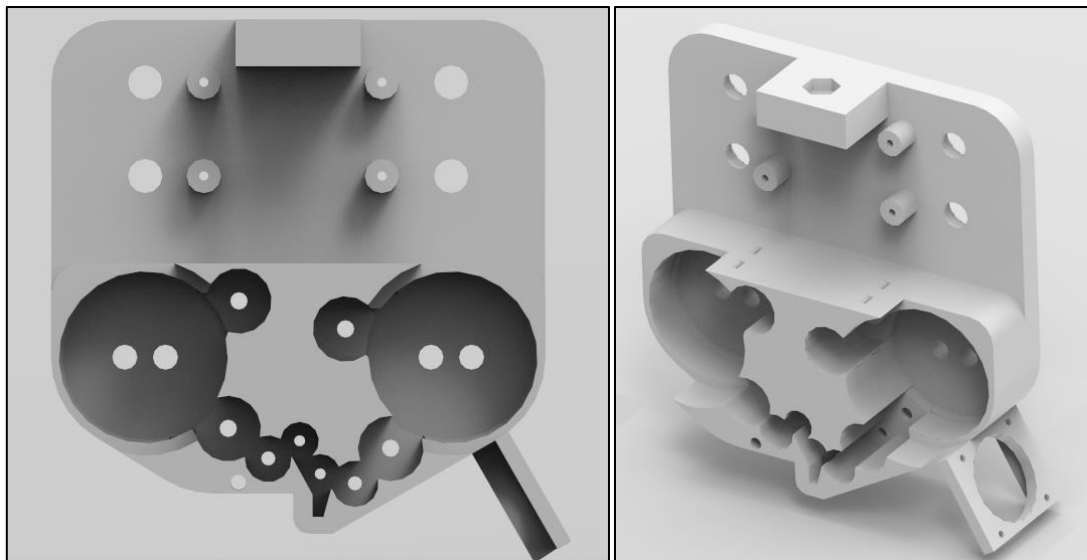


Figura 47. Diseño del soporte del cabezal v2.0

#### 4.5. Diseño de los rodillos de arrastre.

En este nuevo diseño hacemos uso de la información recopilada en las patentes. Primero se diseña el tren de arrastre basado en el rodillo de aplicación de la patente número **US 6.968.883 B2**.

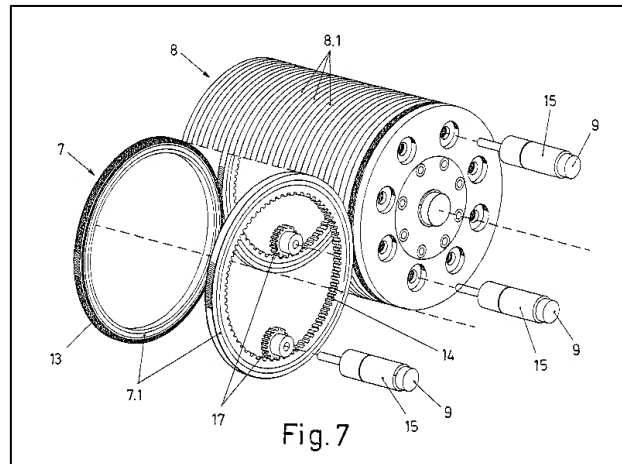


Figura 48: Rodillos de arrastre patente US 6.968.883 B2. Manuel Torres.

Esta consiste principalmente en anillos concéntricos movidos por actuadores a través de sistema de engranajes planetario y separados entre sí por rodamientos, un par de cada una de estas arandelas arrastrará las fibras hasta el punto de aplicación.

Para llevar a cabo tal mecanismo hacemos uso de los ya citados servomotores, dos por cada rodillo de arrastre. En cuanto al sistema de engranajes hacemos uso de un rodamiento para ejes axiales ya que es ideal en peso y tamaño para el conjunto de la máquina, además de ser configurable en número de eslabones pudiendo ser usado el eslabón del centro para el arrastre de la fibra.

Dimensiones (mm) Dimension (mm)					Coeficiente de carga (KN) Load rating (KN)		Velocidad límite (rpm) Speed limit (Rpm)		Peso (Kg) Weight (Kg)	Sigla Designation
d (mm)	D (mm)	H (mm)	D1 (mm)	B (mm)	Dinámico Dynamic C	Estático Static C <sub>0</sub>	Lubrificación Lubrication			
							Grasa Grease	Aceite Oil		
10	32	22	17	5	16	26	7650	9000	0.084	52202
15	40	26	22	6	22	40	6120	7200	0.15	52204
20	47	28	27	7	27	54	5738	6750	0.22	52205
	52	34	27	8	34	59	4820	5670	0.33	52305
	70	52	32	12	72	134	3825	4500	1	52407
25	52	29	32	7	25	50	5126	6030	0.25	52206
	60	38	32	9	37	70	4055	4770	0.45	52306
	80	59	37	15	86	167	3290	3780	1.45	52406

Los rodillos de arrastre, por tanto, están compuestos por los servomotores y los rodamientos como muestra el siguiente conjunto.

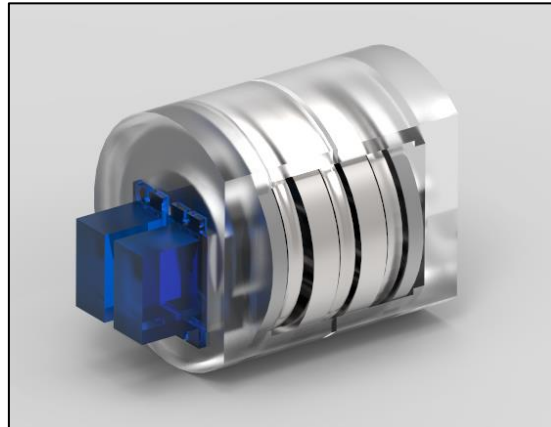


Figura 49. Conjunto rodillo de arrastre.

La transmisión del movimiento de los servomotores hacia los discos de arrastre se hará por medio de un sistema de eje y engranaje para mover en cada momento la fibra que nos interese, controlando de esta manera todas por individual.

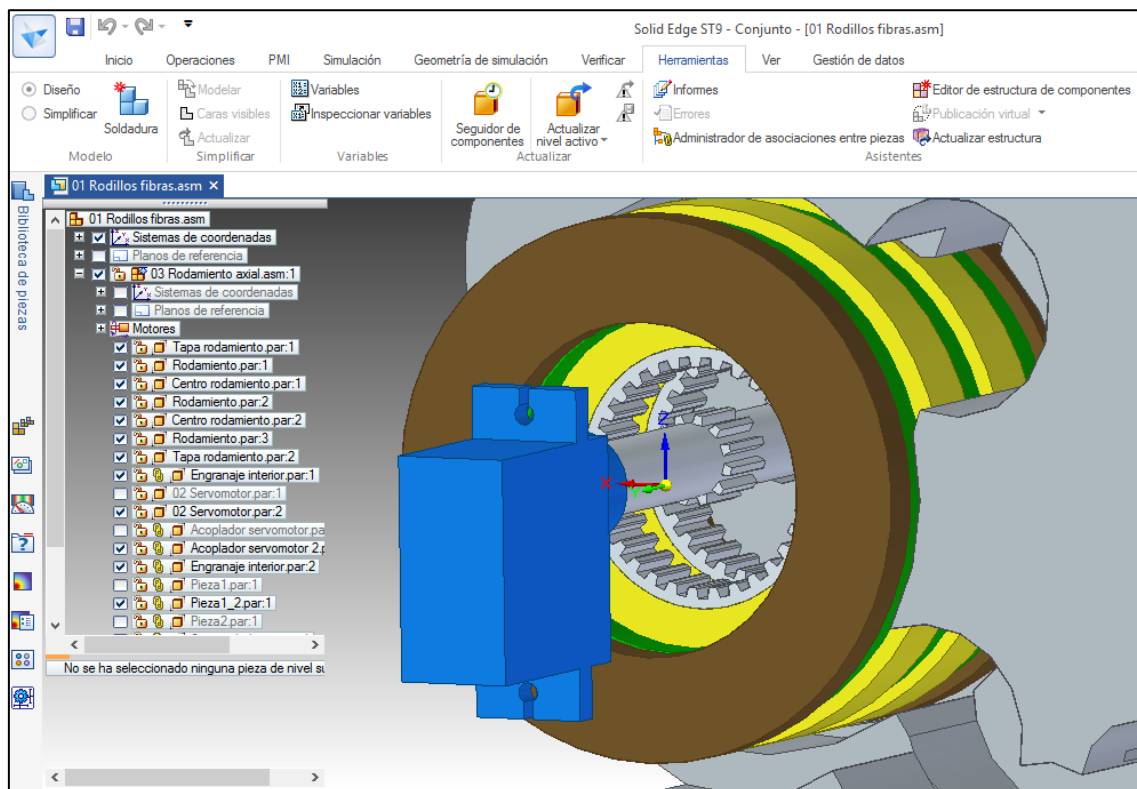


Figura 50. Transmisión del sistema de arrastre.

#### 4.6. Diseño del eje C.

El eje C tiene como objetivo rotar e cabezal en el eje Z, para poder hacer cambios de sentido, curvas etc. Por lo general un mecanismo de este tipo conste de dos rodamientos, uno en la parte superior y otro en la parte inferior de su disposición tubular. En la parte superior incorpora un engranaje de tierra para la rotación.

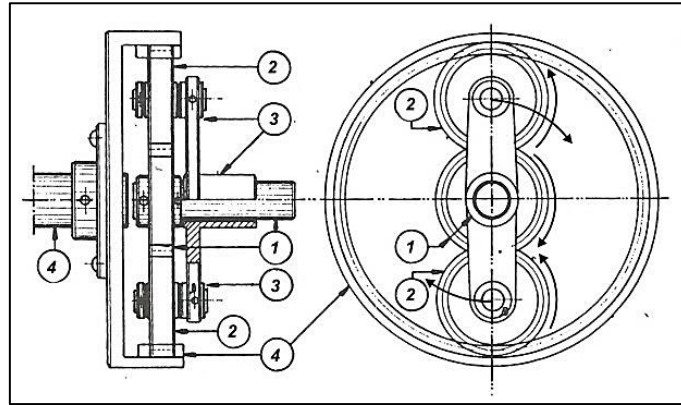


Figura 51. Ejemplo transmisión por engranajes epicicloidal.

El movimiento se realiza mediante dos servomotores síncronos AC ("BRUSHLESS") en configuración tándem, con regulador de frecuencia de estado sólido y con onda "SINUSOIDAL" para mejorar el rendimiento del motor, con un reductor de holgura cero y dos piñones precargados enganchados con el engranaje. La velocidad de rotación es variable y regulada dentro de un rango especificado.

En este trabajo el sistema de transmisión del eje C está compuesto por un soporte que alberga el rodamiento que dará movimiento al cabezal, un eje transmitirá el movimiento del engranaje mayor al cabezal; un motor nema 17 será el encargado de otorgar movimiento a través de un engranaje acoplado a su eje como se puede ver en la siguiente imagen.

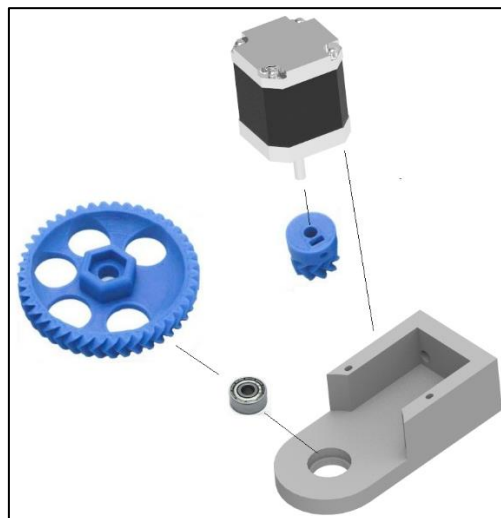


Figura 52. Sistema transmisión eje C.

#### **4.7. Montaje de la estructura.**

Una vez descrito cada uno de las partes, queda el montaje del mecanismo quedando de la siguiente manera.

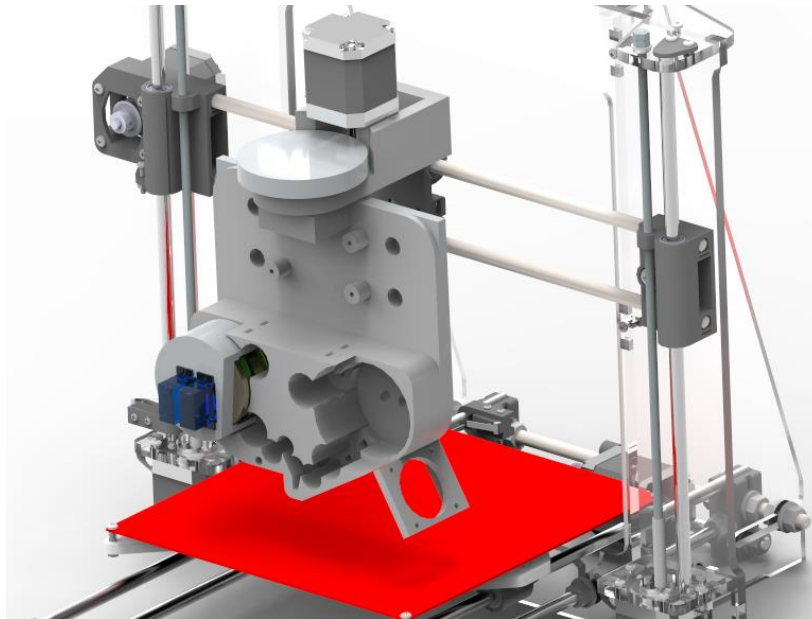


Figura 53. Montaje estructura y cabezal v2.0

#### 4.8. Sistema de corte de fibras.

Un sistema sincronizado de corte de fibras es necesario para que el proceso continúe su trabajo de forma productiva. Los sistemas de corte dependen también del sistema de encintado, AFP o ATL.

En el caso de ATL lleva un sistema de corte por ultrasonidos 40 kHz, esta lleva un mecanismo de movimiento lineal en cuyo extremo lleva un sonododromo más una cuchilla para cortar la fibra de manera transversal y de forma precisa; se debe tener cuidado al ajustar la profundidad de corte para no cortar también el papel y perder la continuidad en la aplicación de la fibra.

En cuanto al sistema AFP, el corte se debe hacer en cada fibra de manera individual, para ello se aplica un sistema sincronizado de arrastre y corte como se explicó en la patente **US 2007/0234907 A1** en el apartado 4.4. Una de las aplicaciones más importantes del corte de fibras individuales es el de aplicar cintas en formas complejas y el de poder aplicar cintas con discontinuidades como en el caso de ventanas, etc.

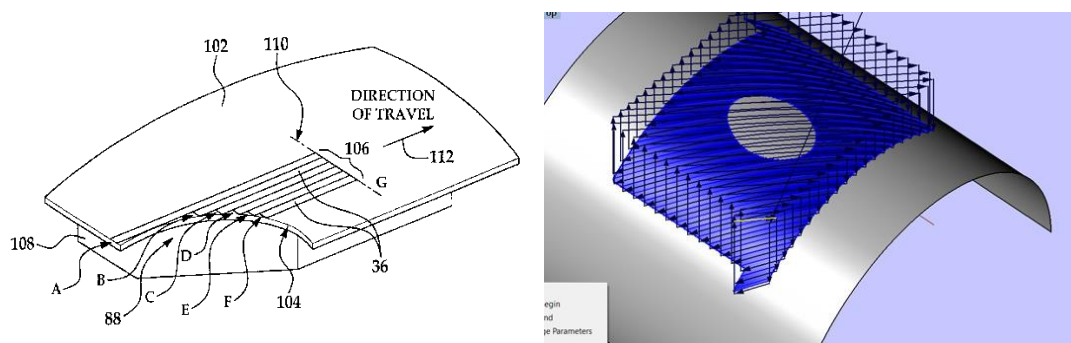


Figura 54. Ejemplos de aplicación de corte de cintas individuales.

El corte y aplicación de fibras se controla desde el controlador CNC y según parámetros de corte para cada aplicación enviados por un postprocesador al CNC. En este trabajo no se lleva a cabo el sistema de corte funcional de la máquina.

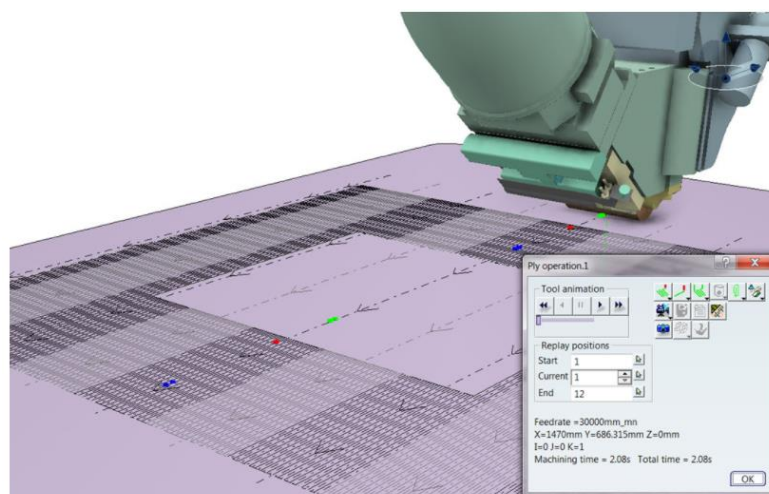


Figura 55. Ejemplo sistema postprocesador para encintado discontinuo.



#### 4.9. Sistema de compactación.

El punto de aplicación al conjunto de fibras se les aplica presión con un rodillo de compactación y temperatura, con un sistema calefactor, para consolidar la nueva cinta con las capas previamente colocadas.

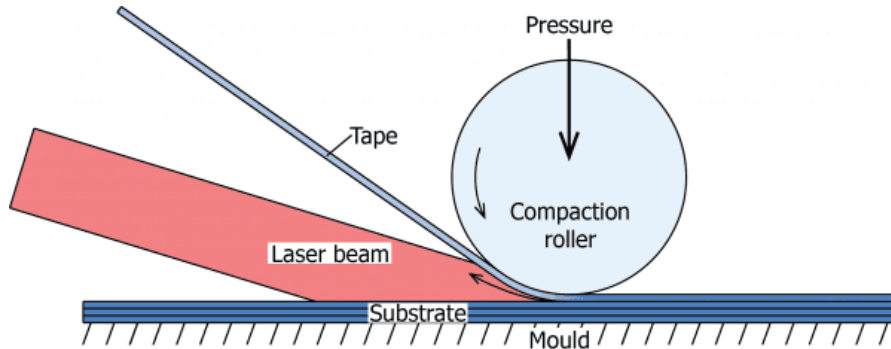


Figura 56. Sistema de compactación.

El rodillo de compactación, consiste en un tubo de acero montado en cojinetes y cubierto con un silicio curado especial (Elastosil<sup>®</sup>). Este sistema se utiliza para compactar directamente sobre el material que se adapta a las superficies irregulares de las herramientas. Básicamente, el rodillo se utiliza cuando se requieren mayores capacidades de compactación, teniendo en cuenta que permite aplicar hasta 8 bar de presión sobre la cinta. Es el elemento a utilizar cuando la colocación de la cinta presenta rampas agudas debido a su mayor capacidad de compactación.

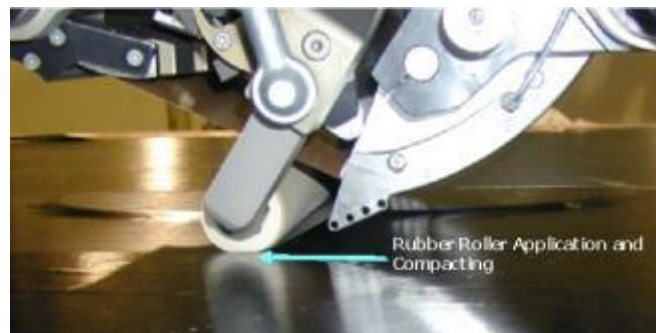


Figura 57. Rodillo de compactación.

El conjunto de compactación está listo, por construcción, para absorber posibles deformaciones de herramienta hasta un total de  $\pm 5$  mm en el nivel programado en el CNC.

#### **4.10.Sistema calefactor de las cintas.**

Las cintas de fibra de carbono preimpregnada se almacenan a una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  para evitar que las fibras curen antes de tiempo. El cabezal debe llevar un sistema para calentar la cinta y disminuir la viscosidad de la resina, permitiendo de esta forma un proceso de colocación adecuado de la fibra con ciertas resinas. Existen dos tipos calefactores de cintas, un es por aire caliente y el otro por infrarrojos.

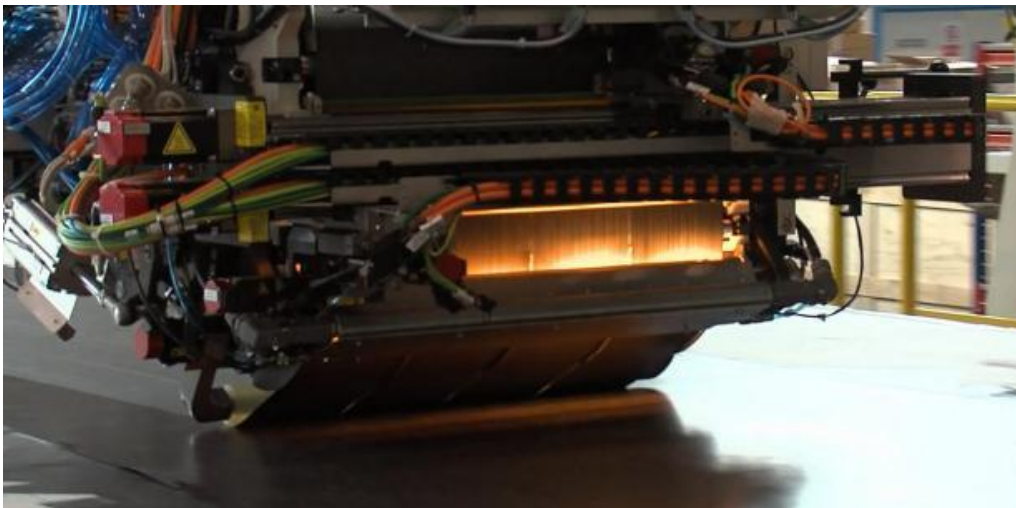
- **Aire caliente.**

Este sistema puede funcionar tanto en modos manuales como automáticos y puede calentar la cinta hasta  $70^{\circ}\text{C}$  dependiendo de los requerimientos.

El sistema tiene un ventilador que envía aire a través de un calentador y el aire caliente se aplica en la cinta. El calentador se controla con un regulador digital para introducir la temperatura deseada. El regulador mantiene la temperatura seleccionada usando un termostato a  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

- **Infrarrojos.**

Este sistema puede calentar la cinta hasta  $50^{\circ}\text{C}$  ajustable dependiendo de los requerimientos. El sistema tiene una lámpara IR que funciona como un calentador y el calor se aplica en la cinta. El calentador se controla con un regulador digital para introducir la potencia deseada. Este proceso se puede controlar desde el postprocesador.



**Figura 58. Sistema calefactor por infrarrojos.**

En esta aplicación utilizaremos el método calefactor por aire caliente, para ello la tarjeta Shield viene preparada con una entrada para un termistor que nos servirá para saber en todo momento la temperatura de aplicación, una salida a 12V para un ventilador que usaremos para aplicar el calor al punto de soldadura de las fibras y como calefactor utilizaremos un filamento de tungsteno, haremos pasar una tensión alterna de 230V de modo que este filamento funcione como resistencia calefactora.

#### **4.11.Fabricación del Cabezal.**

El proceso de fabricación del cabezal se llevó a cabo por fabricación aditiva, o fabricación por adición, es un concepto de producción a través del cual el material (plástico ABS) es depositado capa a capa de manera controlada allí donde es necesario. Con esta técnica, que comúnmente se conoce como **impresión 3d**, se producen formas geométricas personalizadas según las necesidades de cada sector.



Figura 59. Impresora 3D Ultimaker

Comparada con las técnicas de fabricación tradicionales, esta tecnología **reduce procesos intermedios** como la producción de utillajes, por lo que permite obtener piezas hasta un **90% más rápido**. Es más, al utilizar únicamente el material para la fabricación de la pieza no se generan desechos, los componentes tienen un coste menor y se produce de manera más sostenible.

Son muy diversas las técnicas de Fabricación Aditiva, el más común es el que permite obtener piezas desde un archivo CAD 3D, “imprimiéndolas” de forma totalmente controlada sobre una superficie. Pero primero es necesario preparar la pieza con los soportes necesarios en el caso que llevara voladizos.

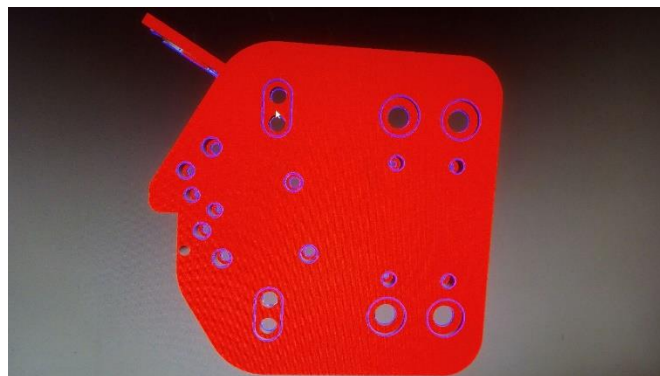


Figura 60. Inserción de voladizos en la pieza

A continuación, se introduce el modelo CAD en un software y una vez introducidos los parámetros de máquina, estrategia de impresión, orientación, etc. Obtenemos el lenguaje maquina o código G que introducimos en la impresora con el fin de obtener la pieza.

Obteniendo como resultado la pieza fabricada en ABS acorde con el diseño, pero con una ligera desviación debida a las dilataciones que sufre el plástico, pero que cumple de manera funcional con el objetivo.



Figura 61. Cabezal v2.0 impreso en ABS.

En un último proceso es necesario eliminar los soportes que de los voladizos para que quede acorde con el modelo.



Figura 62. Cabezal con soportes.

## 5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.

### 5.1. Descripción general del sistema

El sistema AFP descrito anteriormente permite el encintado de tiras de fibra de carbono para paneles en curvatura y plana. La máquina consiste en una máquina tipo gantry, cuyos movimientos son controlados por un CNC basado en Arduino, y un cabezal que incorpora los rodillos de arrastre de las cintas. Además de esto tenemos un software y un paquete de programación (firmware) para el control de los movimientos. La máquina consta de 4 movimientos, los ejes cartesianos X, Y, Z y un tercer eje C que rota el cabezal en el eje Z.

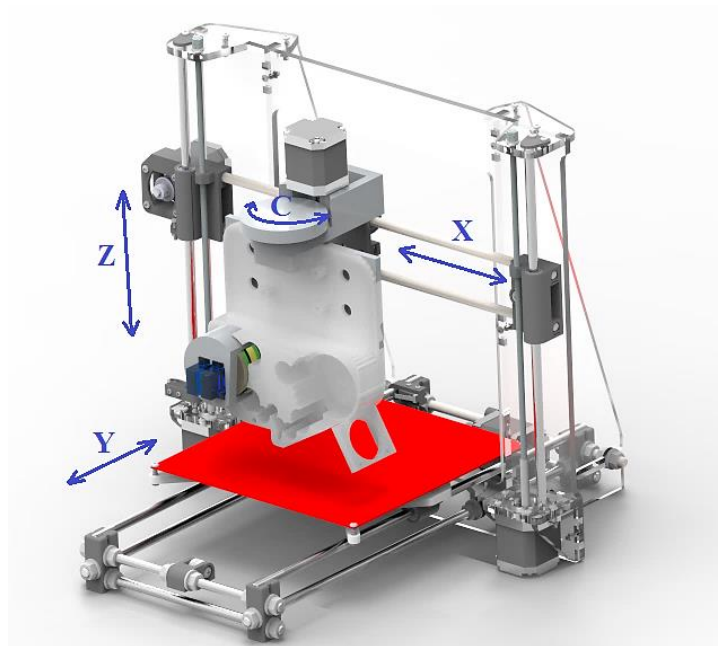
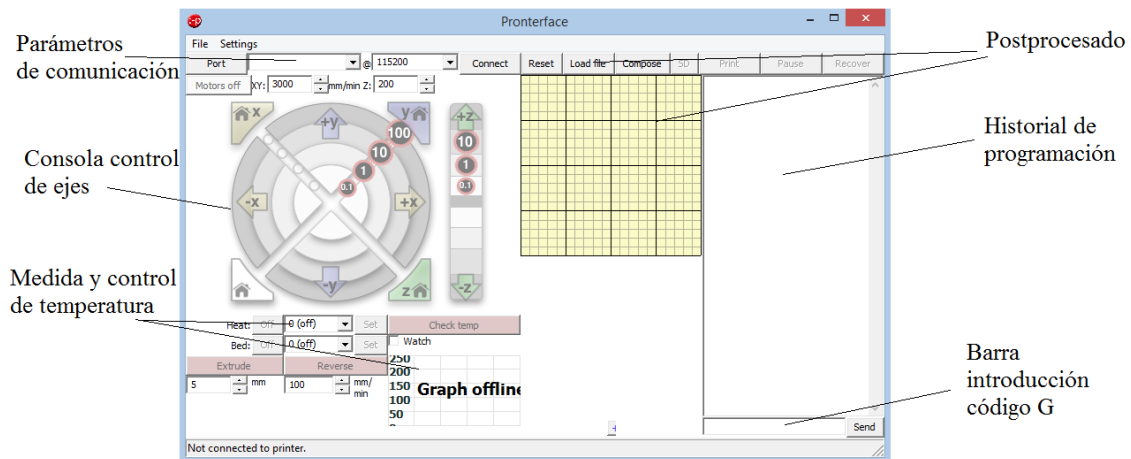


Figura 63. Definición de los ejes de la máquina.

En el apartado 4.2 se describe los accionamientos que realizan los movimientos, pero es la programación la que ejecutará las ordenes enviadas a través de una consola de programación. Esta programación se hará en el entorno Arduino y el lenguaje que se aplicará para realizar los movimientos será el ISO para máquinas de mecanizado CNC, más conocido como código G.

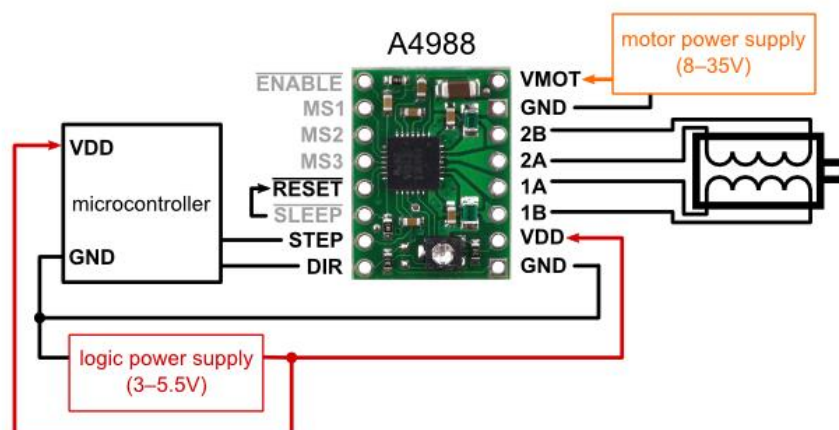
## 5.2. Interface Hombre-Máquina.

En este caso el interface es digital, nos permite comunicarnos con el Arduino a través de un puerto COM, dispone de una consola de control de los ejes pudiendo variar el ancho de paso de cada uno de ellos, tiene además unos parámetros para el control de temperatura y una barra para introducir las instrucciones de movimiento en código G.



## 5.3. Control ejes X, Y, Z.

El control de estos ejes se hace a través de los motores paso a paso NEMA17. Como se dijo en el apartado 4.2, estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada para conseguir un giro. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la siguiente secuencia.





PASO	TERMINALES			
	1A	1B	2A	2B
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

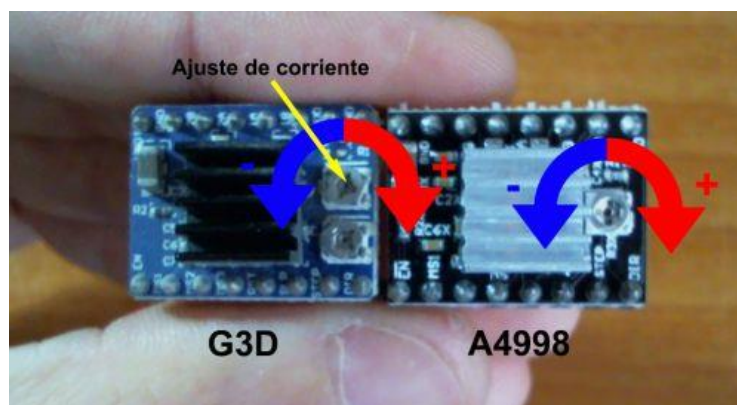
**Tabla 1: Secuencia para manejar motores paso a paso bipolares.**

Los motores paso a paso tienen típicamente una especificación de tamaño de paso (por ejemplo, 1,8° o 200 pasos por revolución), que se aplica a etapas completas. El controlador de microstepping A4988 Pololu será el controlador que utilizaremos, este permite accionar un motor en modo de dieciseisavo de paso a máxima resolución, es decir, este otorgará al motor 200 pasos por revolución con 3200 micro-pasos PWM por revolución utilizando los cuatro niveles de corriente que necesita el motor paso a paso. Para ello es necesario configurar la resolución haciendo un puente entre 5Vcc y MS1, MS2 y MS3 de la tarjeta shield.

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
High	High	High	Sixteenth step

Cada impulso a la entrada STEP corresponde a un micropaso PWM del motor paso a paso en la dirección seleccionada por el pin DIR.

Una vez configurada la resolución del motor, es necesario configurar la corriente que pasa por el Pololu al motor, lo configuramos mediante el potenciómetro que lleva el Pololu, de tal forma que ajustemos 200mA para el eje X e Y y 400mA para el eje Z al ser un único controlador el que mueve los dos motores del eje Z.



**Figura 64. Control de corriente Pololu A4998**



## 5.4. Firmware.

El firmware es la programación que introduciremos en el controlador (Arduino Mega 2560), esta programación es la que recibirá el código G del interfaz hombre-máquina a través del puerto de comunicación y ejecutará las instrucciones necesarias para mover los motores. Este firmware es una versión moderna de control para impresoras 3D llamado MARLIN 3D PRINTER FIRMWARE del año 2016. Antes de cargar el firmware al control es necesario configurar la versión de la tarjeta shield (Ramps 1.4), los puertos de comunicación, etc.

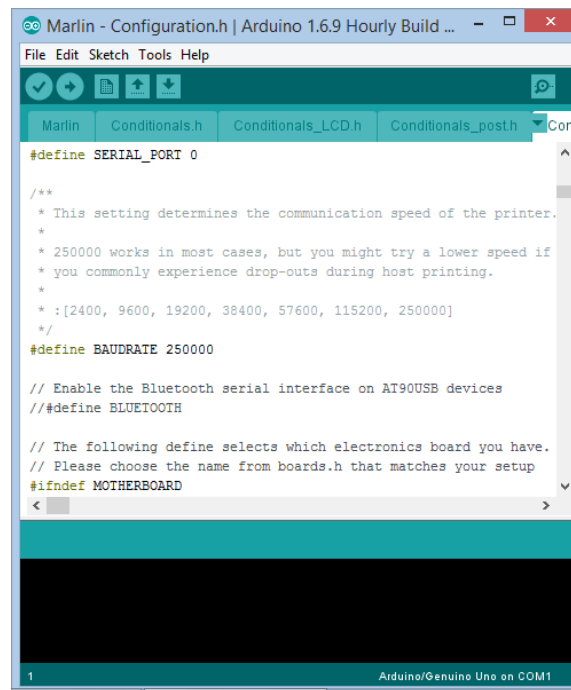


Figura 65. Interface programación Arduino.

Una vez introducido el firmware a la impresora, se puede mover la máquina a través de un código G cuyas instrucciones las puede encontrar en el siguiente enlace:

<http://reprap.org/wiki/G-code#>

### Examples

```
G0 X12          ; move to 12mm on the X axis
G0 F1500        ; Set the feedrate to 1500mm/minute
G1 X90.6 Y13.8 E22.4 ; Move to 90.6mm on the X axis and 13.8mm on the Y axis while extruding 22.4mm of material
```

## 5.5. Control servomotores.

En este caso los servomotores constan de un motor de corriente continua y, un sistema de engranajes reductor acoplado a un potenciómetro que lee en todo momento la señal y a través de circuito comparador enviamos la nueva posición al motor.

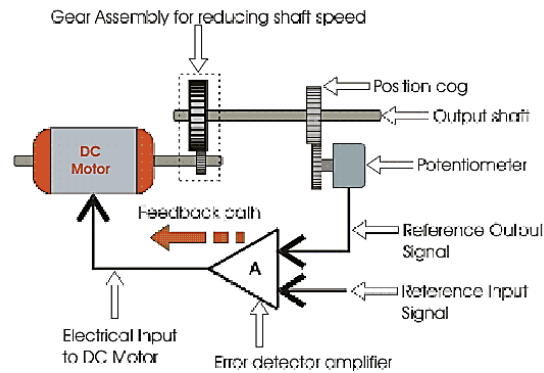


Figura 66. Configuración servomotor SG90

Normalmente tienen un margen de operación de entre 0° y 180°, pero en este caso han sido modificados para obtener un giro de 360°. Estos servomotores funcionan a 5V más una señal de control por modulación de pulso PWM; los pines lo podemos ver en la siguiente imagen.

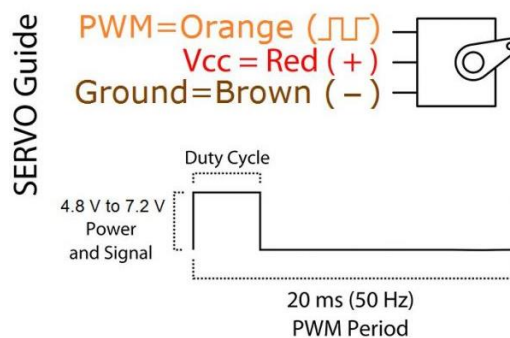


Figura 67. Señales de entrada del servomotor.

Una vez entendido el sistema se crea en la Ramps un programa actuar sobre los servomotores a través de la interface hombre-máquina. Las instrucciones esta configurada de la siguiente manera.

### M42 P11 S255

Donde:

- M42** Instrucción para habilitar el movimiento del servomotor.
- P11** Habilita el pin del servomotor D11
- S255** Los grados que se va mover 0-255 equivale a 0° - 180°

## 5.6. Control eje C.

El eje C, como ya vimos está compuesto por un motor Nema 17 más un engranaje de tracción acoplado al motor, este engranaje esta acoplado al engranaje reductor.

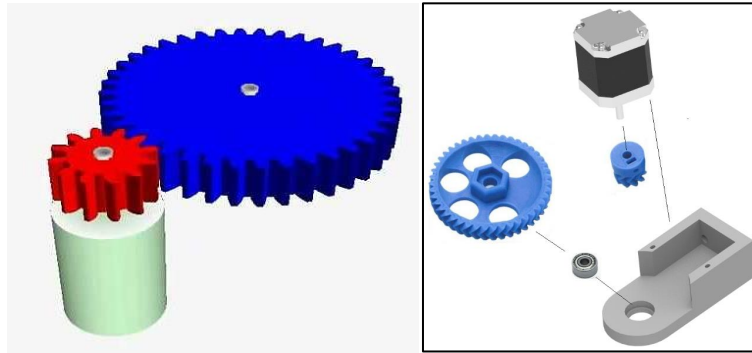


Figura 68. Sistema de transmisión eje C

El engranaje del motor tiene  $Z1 = 9$  dientes mientras que la rueda conducida tiene  $Z2 = 47$ , para girar  $45^\circ$  necesito que la rueda conductora gire 1,3 veces. Haciendo pruebas, configuramos en el firmware el número de pasos por unidad hasta conseguir girar  $45^\circ$ .

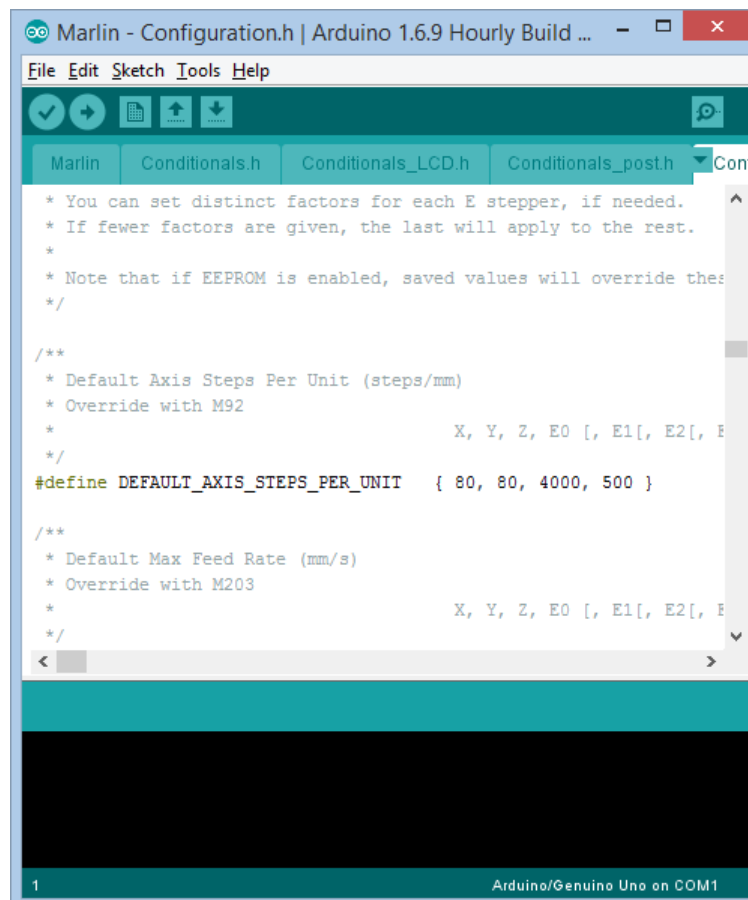


Figura 69. configuración pasos por unidad de los ejes.

## 5.7. Control sistema calefactor.

El sistema calefactor, como ya se comentó en el apartado 4.10 está compuesto de un ventilador y de una resistencia de un secador común.

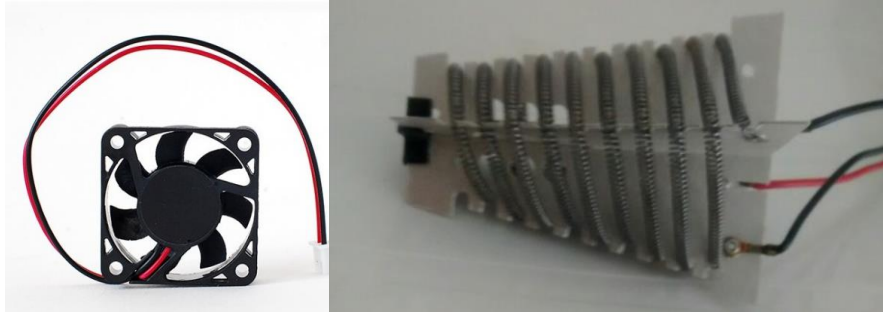


Figura 70. Sistema calefactor.

El control será un todo o nada. Para ello, la medida de temperatura la obtendremos a través de un termistor y a través de un control PID configurado en el controlador, actuará este sobre un relé a 12V que activará o desactivará la resistencia que funcionará a 230V.

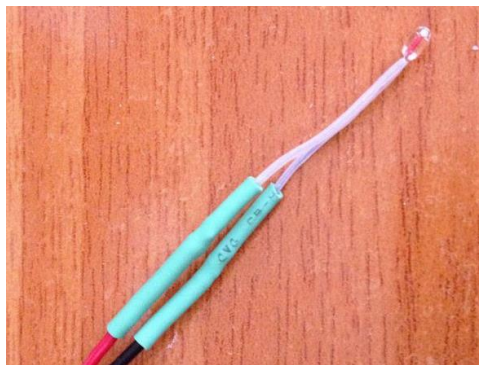
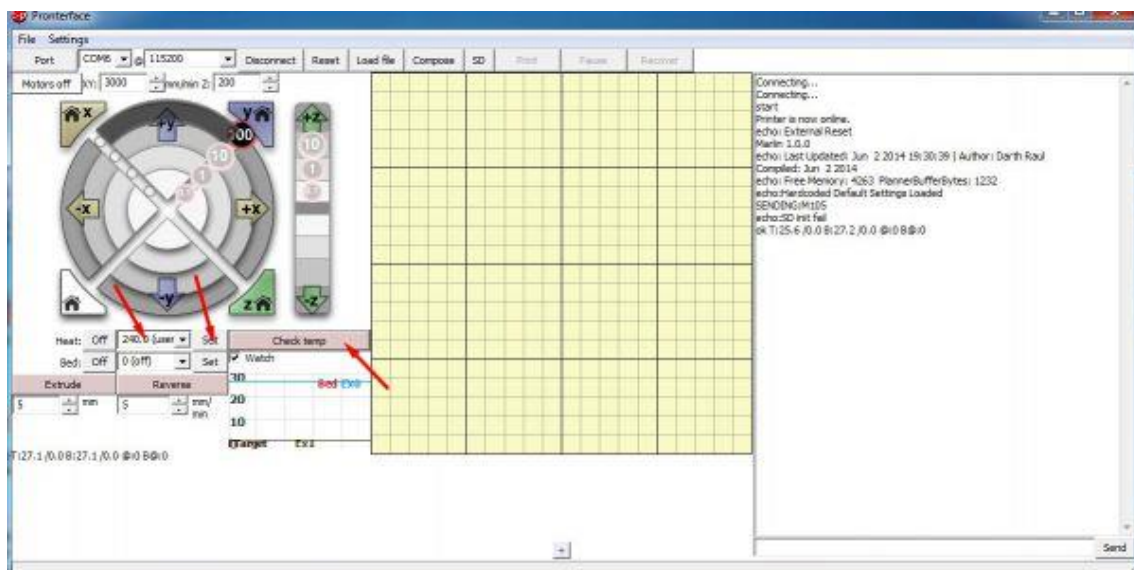
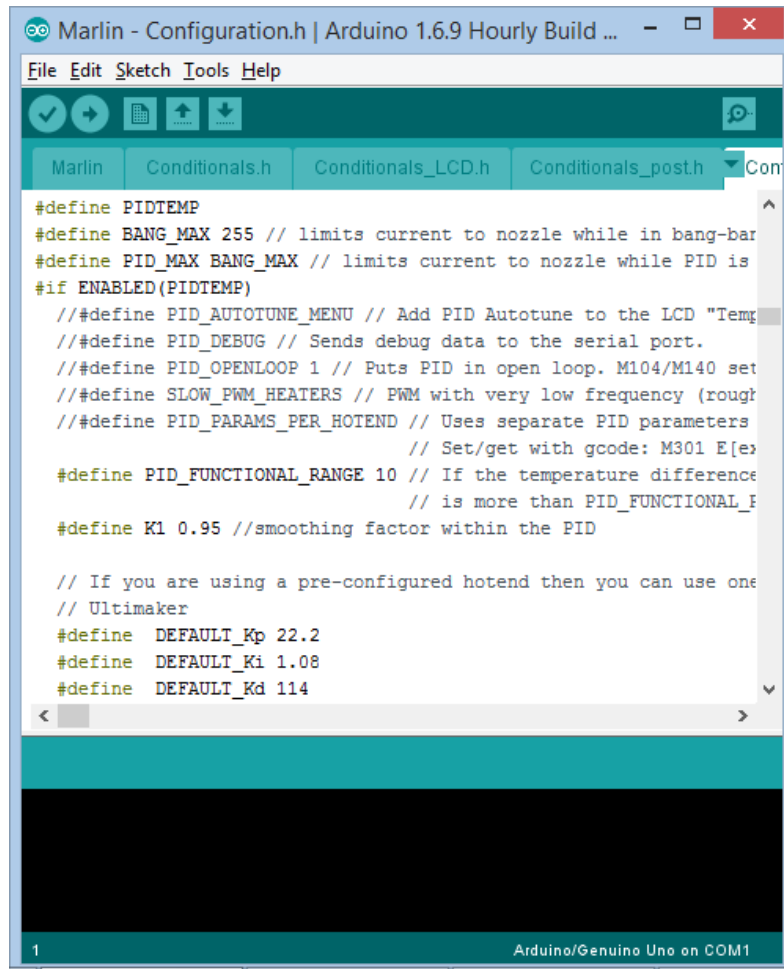


Figura 71. Termistor de 100K

El interface está preparado para introducir una temperatura que será leída por el termistor y un visor para seguir en todo momento la regulación de la temperatura.



El Firmware ya posee un controlador PID para el calefactor, este consta de unos parámetros que deben ser calibrados ya sea manualmente o automáticamente siendo esta última opción la más adecuada.



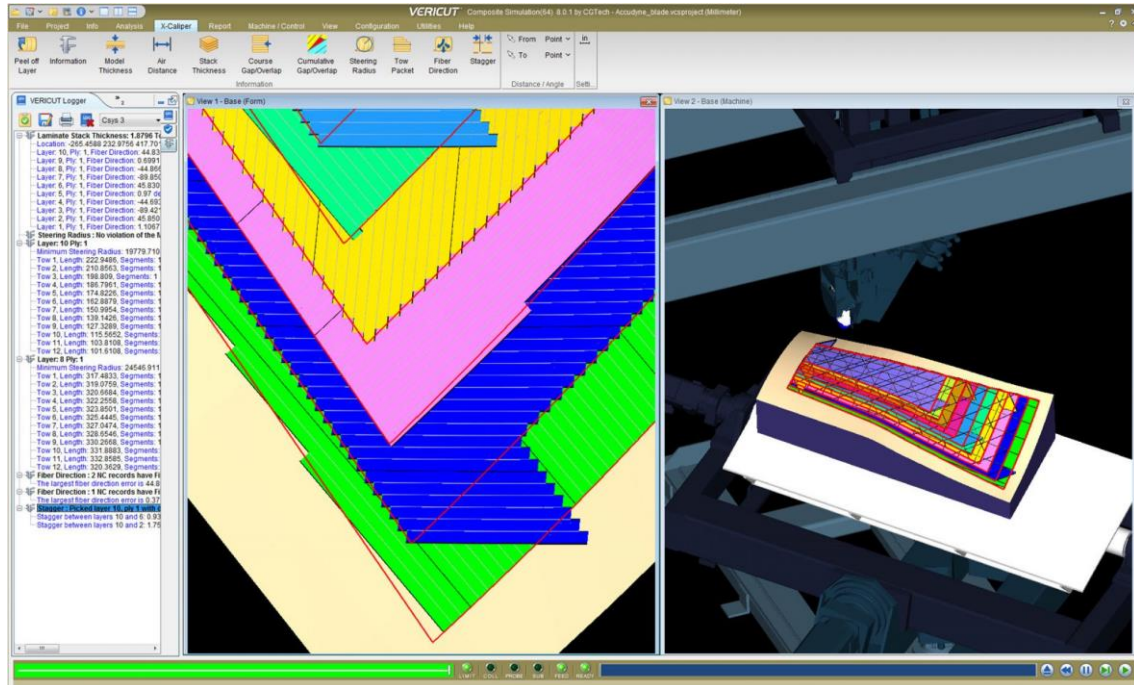
```
#define PIDTEMP
#define BANG_MAX 255 // limits current to nozzle while in bang-bar
#define PID_MAX BANG_MAX // limits current to nozzle while PID is
#if ENABLED(PIDTEMP)
  // #define PID_AUTOTUNE_MENU // Add PID Autotune to the LCD "Temp
  // #define PID_DEBUG // Sends debug data to the serial port.
  // #define PID_OPENLOOP 1 // Puts PID in open loop. M104/M140 set
  // #define SLOW_PWM_HEATERS // PWM with very low frequency (rough
  // #define PID_PARAMS_PER_HOTEND // Uses separate PID parameters
                                // Set/get with gcode: M301 E[ex
  #define PID_FUNCTIONAL_RANGE 10 // If the temperature difference
                                // is more than PID_FUNCTIONAL_R
  #define K1 0.95 //smoothing factor within the PID

  // If you are using a pre-configured hotend then you can use one
  // Ultimaker
  #define DEFAULT_Kp 22.2
  #define DEFAULT_Ki 1.08
  #define DEFAULT_Kd 114
```

Figura 72. PID control de temperatura firmware MARLIN.

## 5.8. Post-procesado.

El post procesado en materiales compuestos, se ha desarrollado específicamente para las máquinas encintadoras, consiste en generar el encintado virtualmente y obtener un Código-G para introducir en la máquina y ejecutar las acciones.



Los principales pasos a seguir serían:

1. Defina la estructura de apilamiento utilizando en composites.
2. Crear el diseño de la pieza.
3. Crear superficies de encintado.
4. Defina los puntos de partida.
5. Iniciar el proceso de parámetros máquina de encintado.
6. Defina los parámetros. Normalmente, se cargará un archivo de parámetros con valores más comunes, luego se redefinirán algunos parámetros cargados para ajustarlos a la parte específica.
7. Crear las cintas. Número de secuencias a seguir.
8. Optimizar la geometría de la cinta (eliminar subtópicos, combinar subtows, etc.).
9. Postprocesar.

## 6. Bibliografía

[1] MTORRES: <http://www.mtorres.es/es/aeronautica/productos/fibra-de-carbono>

[2] Department of Mechanical Engineering. Technical University of Munich

[3] Airframe Structural Design. Michael Chun-Yung NIU

[4] Boeign Composite Department.

[5] [http://reprap.org/wiki/G-code#G0\\_.26\\_G1:\\_Move](http://reprap.org/wiki/G-code#G0_.26_G1:_Move)

[6] <https://www.zonamaker.com/>



# I. ANEXO 1

Esquema de conexión tarjeta shield Ramps 1.4 con Arduino Mega 2560 y Pololu A4988.

